



**Marta Juliana Martins
Cardoso**

**Elementos estruturais em aço inoxidável:
aplicações e resistência ao fogo**



**Marta Juliana Martins
Cardoso**

**Elementos estruturais em aço inoxidável: aplicações
e resistência ao fogo**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica do Professor Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, coorientação do Professor Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

À memória do meu pai

o júri

presidente

Prof^a. Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues

Professora auxiliar no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Joaquim Alexandre Mendes de Pinho da Cruz

Professor Auxiliar no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes

Professor Auxiliar no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Esta tese marca o final do meu percurso académico e assinala a concretização de um sonho. Assim, aproveito para expressar aqui agradecimentos a todos os que me apoiaram ao longo deste caminho.

Começo por agradecer ao meu orientador Professor Nuno Lopes pois, sem a sua valiosa ajuda, disponibilidade, conhecimento e motivação transmitidos, este trabalho não seria possível.

Ao meu coorientador Professor Paulo Vila Real, pelas sugestões, críticas construtivas e disponibilidade que dispensou para me auxiliar.

À empresa Arestalfer por me ter proporcionado o estágio e por toda a ajuda e compreensão prestadas durante o período da nossa colaboração.

Aos meus colegas da Arestalfer, agradeço a forma com fui acolhida e de como sempre me trataram como par, pela paciência, ajuda e experiência partilhadas.

Aos meus amigos Daniela, Daniel, Sara, Mariana e André por sempre estarem ao meu lado.

Aos meus colegas de curso, em especial ao Carlos, Correia, Ranieri, Diego, Pata, Cátia e Rui, por todos os momentos partilhados ao longo destes anos.

Por fim, agradeço à minha família, especialmente à minha mãe, por todos os ensinamentos transmitidos, carinho e compreensão e, por sempre me ter deixado seguir os meus sonhos, aconselhando e indicando os melhores caminhos a seguir.

Parte deste trabalho foi realizado no âmbito do projeto “StaSteFi - Dimensionamento ao fogo de elementos estruturais em aço inoxidável”, POCI-01-0145-FEDER-030655, suportado pelo orçamento do POCI Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) na sua componente FEDER e pelo orçamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P.”

Muito obrigada

palavras-chave

Aço inoxidável, Resistência ao fogo, Elementos Estruturais, Eurocódigo 3, Revisão, Orçamentação, Projeto.

resumo

A presente dissertação apresenta o estudo desenvolvido no âmbito da resistência ao fogo de elementos estruturais em aço inoxidável, realizado em paralelo com o estágio curricular na empresa Arestalfer, S.A.

O objetivo do estudo consistiu em comparar a influência na resistência ao fogo da lei constitutiva do aço inoxidável atualmente apresentada no Eurocódigo 3 com a influência da nova revisão dessa mesma lei, analisando diferentes comportamentos mecânicos na resistência última do material.

Com a realização do estágio curricular pretendeu-se concretizar uma aproximação entre a realidade da experiência académica com a de uma empresa, empregando as competências adquiridas ao longo do curso nas tarefas que foram desempenhadas.

Para atingir os objetivos propostos no estudo académico, foram testados, através do software SAFIR, diversos perfis comerciais de aço inoxidável de três classes diferentes, expostos a condições de incêndio, confrontado os resultados obtidos para a versão atual do EC3 e para a sua proposta de revisão. Por fim, aplicando conceitos do estudo académico a um caso prático tratado no estágio, foi ainda realizado um cálculo simplificado de uma escada helicoidal em aço inoxidável, acompanhada da verificação de segurança desta em situação de incêndio.

O estágio curricular foi dividido em duas partes sendo a primeira o período de tempo que foi passado a elaborar orçamentos e, a segunda, o período passado no gabinete de projeto da empresa.

keywords

Stainless steel, Fire resistance, Structural elements, Eurocode 3, Revision, Budget, Design.

abstract

This dissertation presents the study developed in the scope of the resistance to fire of stainless steel structural elements carried out simultaneously with a curricular internship in the Arestalfer S.A. enterprise.

The aim of this study was to compare the influence of the stainless steel constitutive law on the fire resistance currently presented in Eurocode 3 with the influence of a revision to that law by analyzing different mechanical behavior in the ultimate strength of the material.

The curricular internship bridged the reality of the academic experience with the one in a company, by using the skills acquired throughout the course in the tasks that were developed.

In order to achieve the objectives proposed in the academic study, several commercial stainless steel profiles of three different classes, exposed to fire conditions, were tested using the SAFIR software, comparing results for the current version of the EC3 and for its proposed revision. Finally, by applying concepts from the academic study to a practical case that was analyzed during the internship, a simplified calculation of a helicoidal staircase in stainless steel was also carried out, including the safety verification in a fire situation.

The curricular internship was divided in two phases. The first one consisted of budget calculation, and the second was the period spent on the design office of the company.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	iii
ÍNDICE DE TABELAS	v
NOMENCLATURA.....	vii
1. Introdução.....	5
1.1 Enquadramento geral	5
1.2 Características gerais do aço inoxidável.....	5
1.3 Motivação e objetivos do estudo académico	9
1.4 Estrutura da dissertação	10
2. Aplicações na construção.....	15
2.1 Considerações gerais	15
2.2 Exemplos de aplicações não estruturais	15
2.3 Exemplos de aplicações estruturais	17
2.4 Considerações finais	20
3. Propriedades mecânicas do aço inoxidável a temperaturas elevadas	25
3.1 Considerações gerais	25
3.2 Lei constitutiva segundo o Eurocódigo 3	25
3.3 Lei constitutiva segundo a proposta de revisão do Eurocódigo 3	28
3.4 Adaptação das curvas das leis constitutivas	31
3.4.1 Lei constitutiva para o aço inoxidável 1.4301	32
3.4.2 Lei constitutiva para o aço inoxidável 1.4462	33
3.4.3 Lei constitutiva para o aço inoxidável 1.4003	34
3.5 Considerações finais	36
4. Resistência estrutural ao fogo	41
4.1 Considerações gerais	41
4.2 Regras de cálculo.....	42
4.2.1 Resistência da secção.....	42
4.2.1.1 Segundo o Eurocódigo 3.....	42
4.2.1.2 Segundo a proposta de revisão do Eurocódigo 3.....	43
4.2.2 Resistência do elemento	45
4.2.2.1 Segundo o Eurocódigo 3.....	45
4.2.2.2 Segundo a proposta de revisão do Eurocódigo 3.....	45
4.2.3 Comparação entre fórmulas.....	46
4.3 Análise numérica	49

4.3.1	<i>Modelação numérica e casos de estudo</i>	49
4.3.2	<i>Colunas</i>	50
4.3.2.1	<i>Aço inoxidável de classe 1.4301</i>	50
4.3.2.2	<i>Aço inoxidável de classe 1.4462</i>	52
4.3.2.3	<i>Aço inoxidável de classe 1.4003</i>	54
4.3.3	<i>Vigas</i>	58
4.3.3.1	<i>Aço inoxidável de classe 1.4301</i>	58
4.3.3.2	<i>Aço inoxidável de classe 1.4462</i>	59
4.3.3.3	<i>Aço inoxidável de classe 1.4003</i>	60
4.4	<i>Considerações finais</i>	63
5.	Exemplo de cálculo de uma aplicação estrutural em aço inoxidável	69
5.1	<i>Considerações gerais</i>	69
5.2	<i>Vigas de degraus de escada</i>	70
5.2.1	<i>Verificações de segurança para ELU para os degraus</i>	71
5.2.2	<i>Cálculo da resistência em situação de incêndio para os degraus</i>	74
5.3	<i>Coluna de suporte de escada</i>	75
5.3.1	<i>Verificações de segurança para ELU para a coluna</i>	75
5.3.2	<i>Verificação de segurança em situação de incêndio para a coluna</i>	76
5.4	<i>Considerações finais</i>	77
6.	Considerações finais	83
6.1	<i>Conclusões</i>	83
6.2	<i>Desenvolvimentos futuros</i>	84
	Referências Bibliográficas	87
	Anexos: Relatório das atividades desenvolvidas durante o estágio	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mecanismo de regeneração do aço inoxidável (Euro Inox, 2002)	7
Figura 2 Evolução dos preços do aço inoxidável 1.4301 e 1.4401 e aço carbono (Lopes, 2019).....	8
Figura 3 Exemplo do uso de aço inoxidável em paredes verdes (Rostan Tensile Architecture, 2018).....	16
Figura 4 Chrysler Building, Nova Iorque, EUA (Outokumpu, 2014).....	16
Figura 5 Edifício habitacional em Düsseldorf, Alemanha (Helzel, 2002).....	17
Figura 6 Parliament Library Building Domes, Nova Deli, Índia e pormenor de uma ligação (SCI, 2011)	17
Figura 7 Ponte pedestre Newcastle Memorial Walk Newcastle, Austrália (Pilcher, 2015)	17
Figura 8 Aeroporto Internacional de Haneda, Tóquio, Japão (ISSF, 2016).....	18
Figura 9 Aeroporto Francisco Sá Carneiro, Porto, Portugal	18
Figura 10 Obras de reabilitação das termas de São Pedro do Sul (Gazeta da Beira, 2018)	19
Figura 11 Fundação Champalimaud (Neves, 2019).....	19
Figura 12 Farol da Ponta dos Capelinhos (Wikipedia, 2015)	20
Figura 13 Relação tensão-extensão do aço inoxidável a temperaturas elevadas (CEN, 2005b).....	27
Figura 14 Comparação do fator de redução $k_{E,\theta}$ entre o aço inoxidável e o aço carbono ..	28
Figura 15 Comparação entre o fator de redução do módulo de elasticidade, a temperaturas elevadas, de algumas classes de aço inoxidável e aço carbono	28
Figura 16 Relação tensão-extensão do aço inoxidável a temperaturas elevadas	29
Figura 17 Comparação entre a lei constitutiva apresentada no EC3 e a proposta de revisão, para 500°C.....	30
Figura 18 Comparação entre o fator $k_{E,\theta}$ para o aço inoxidável da classe 1.4003, segundo o EC3 e a nova proposta.....	31
Figura 19 Ficheiro de introdução de dados para a lei constitutiva da nova geração do EC3	31
Figura 20 Exemplo dos resultados obtidos para aproximação das leis constitutivas para a temperatura de 600°C e aço inoxidável da classe 1.4301.....	32
Figura 21 Leis Constitutivas para o aço 1.4301	33
Figura 22 Leis Constitutivas para o aço 1.4462	34
Figura 23 Leis Constitutivas para o aço 1.4003	35
Figura 24 Leis Constitutivas para o aço 1.4003 para as temperaturas de 600°C e 700°C..	35
Figura 25 Comparação dos valores da relação $(k_{E,\theta} / k_{y,\theta})^{0.5}$ para cada classe de aço inoxidável com a constante 0,85	43
Figura 26 Comparação dos valores da relação $(k_{E,\theta} / k_{2,\theta})^{0.5}$ para cada classe de aço inoxidável com a respetiva constante.....	44
Figura 27 Gráfico de comparação entre o fator $k_{y,\theta}$ e o fator $k_{2,\theta}$	45
Figura 28 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3 para uma coluna em perfil HEA200 e aço inoxidável 1.4301 no eixo forte.....	50
Figura 29 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3 para uma coluna em perfil HEA200 e aço inoxidável 1.4301 no eixo fraco	50
Figura 30 Resultados para o eixo yy em aço inoxidável de classe 1.4301	51
Figura 31 Resultados para o eixo zz em aço inoxidável de classe 1.4301	51
Figura 32 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3 para uma coluna em perfil HEB200 e aço inoxidável 1.4462 no eixo forte	52

Figura 33 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3 para uma coluna em perfil HEB200 e aço inoxidável 1.4462 no eixo fraco	52
Figura 34 Resultados para o eixo yy em aço inoxidável de classe 1.4462	53
Figura 35 Resultados para o eixo zz em aço inoxidável de classe 1.4462	53
Figura 36 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3 para uma coluna em perfil HEB200 e aço inoxidável 1.4003 no eixo forte	54
Figura 37 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3 para uma coluna em perfil HEB200 e aço inoxidável 1.4003 no eixo fraco	54
Figura 38 Resultados para o eixo yy em aço inoxidável de classe 1.4003	55
Figura 39 Resultados para o eixo zz em aço inoxidável de classe 1.4003	55
Figura 40 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3, na zona plástica, para uma coluna em perfil HEB200 e aço inoxidável 1.4003 no eixo forte	56
Figura 41 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3, na zona plástica, para uma coluna em perfil HEB200 e aço inoxidável 1.4003 no eixo fraco	56
Figura 42 Resultados para o eixo yy em aço inoxidável de classe 1.4003, na adaptação à zona aproximadamente elástica	57
Figura 43 Resultados para o eixo zz em aço inoxidável de classe 1.4003, na adaptação à zona aproximadamente elástica	57
Figura 44 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3 para uma viga com perfil IPE220 e aço inoxidável 1.4301	58
Figura 45 Resultados obtido para uma viga, sujeita a flexão, com perfil IPE220 e aço inoxidável 1.4301	59
Figura 46 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3 para uma viga com perfil IPE220 e aço inoxidável 1.4462	59
Figura 47 Resultados obtido para uma viga, sujeita a flexão, com perfil IPE220 e aço inoxidável 1.4462	60
Figura 48 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3 para uma viga com perfil IPE220 e aço inoxidável 1.4003	61
Figura 49 Resultados obtido para uma viga, sujeita a flexão, com perfil IPE220 e aço inoxidável 1.4003	61
Figura 50 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC3 e a nova geração do EC3, na zona plástica, para uma viga com perfil IPE200 e aço inoxidável 1.4003	62
Figura 51 Resultados para uma viga em perfil IPE220, em aço inoxidável de classe 1.4003, na adaptação à zona aproximadamente elástica	63
Figura 52 Alçado do degrau	70
Figura 53 Seções transversais consideradas: (a) secção a meio comprimento (S2); (b) secção no apoio (S1)	70
Figura 54 Deformada obtida para o cálculo do momento resistente da viga	72
Figura 55 Deformada obtida para o cálculo do momento característico da secção transversal obtido numericamente	72
Figura 56 Deformada obtida para o cálculo do momento critico obtido através da análise numérica	73
Figura 57 Deformada obtida para o cálculo da temperatura crítica numérica para o degrau	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Tipos de aço inoxidável mais usados e respectivas classes (CEN, 2006a).....	15
Tabela 2 Valores nominais de tensão de cedência, tensão última de cedência e módulo de elasticidade para aço inoxidável estrutural (CEN, 2006a)	25
Tabela 3 Expressões para determinar a relação tensão-extensão para aço inoxidável a temperaturas elevadas(CEN, 2005b).....	26
Tabela 4 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4301 à temperatura de 400°C	33
Tabela 5 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4301 à temperatura de 500°C	33
Tabela 6 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4301 à temperatura de 600°C	33
Tabela 7 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4301 à temperatura de 700°C	33
Tabela 8 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4462 à temperatura de 400°C	34
Tabela 9 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4462 á temperatura de 500°C	34
Tabela 10 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4462 à temperatura de 600°C	34
Tabela 11 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4462 à temperatura de 700°C	34
Tabela 12 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4003 á temperatura de 400°C	36
Tabela 13 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4003 á temperatura de 500°C	36
Tabela 14 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4003 á temperatura de 600°C	36
Tabela 15 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4003 á temperatura de 700°C	36
Tabela 16 Propriedades da secção para determinação da resistência.....	44
Tabela 17 Fórmulas usadas para o cálculo do esforço axial	46
Tabela 18 Fórmulas usadas para o cálculo do esforço de flexão	47
Tabela 19 Valores de α para ambos os eixos e para aço inoxidável de classe 1.4301.....	47
Tabela 20 Valores de α_{LT} em diferentes condições para aço inoxidável de classe 1.4301.....	47
Tabela 21 Valores de α para ambos os eixos e para aço inoxidável de classe 1.4462.....	48
Tabela 22 Valores de α_{LT} em diferentes condições para aço inoxidável de classe 1.4462.....	48
Tabela 23 Valores de α para ambos os eixos e para aço inoxidável de classe 1.4003.....	48
Tabela 24 Valores de α_{LT} em diferentes condições para aço inoxidável de classe 1.4003.....	48
Tabela 25 Secções transversais usadas na análise de colunas.....	49
Tabela 26 Secções transversais usadas na análise de vigas	49
Tabela 27 Propriedades do material	69
Tabela 28 Combinações de ações consideradas para efeito de verificação de segurança..	70
Tabela 29 Cargas consideradas para verificações de segurança dos degraus	71
Tabela 30 Resultados obtidos para a secção do apoio dos degraus em ELU	71
Tabela 31 Momento resistente obtido pelas metodologias aplicadas	73
Tabela 32 Combinações de ações em situação de incêndio	74
Tabela 33 Resultados obtidos para a secção do apoio dos degraus em situação de incêndio	74

Tabela 34 Temperatura crítica dos degraus.....	74
Tabela 35 Cargas consideradas para a verificação de segurança da coluna.....	75
Tabela 36 Dados da coluna em perfil CHS 219,1 x 6mm.....	76
Tabela 37 Resultados obtidos para a coluna em ELU.....	76
Tabela 38 Resultados obtidos para a coluna em situação de incêndio.....	76
Tabela 39 Processo iterativo para obtenção da temperatura crítica da coluna.....	77

NOMENCLATURA

Letras do alfabeto latino

A	área
A_{eff}	área efetiva
E_{θ}	módulo de elasticidade à temperatura θ
$E_{0.2p,\theta}$	inclinação a $f_{p0.2,\theta}$
$f_{0.2p,\theta}$	tensão limite convencional de proporcionalidade, referida à tensão de cedência a 20°C
f_u	tensão última do aço
f_y	tensão de cedência do aço a 20°C
$f_{y,\theta}$	tensão de cedência do aço a temperaturas elevadas
$k_{0.2p,\theta}$	fator de redução para o valor de cálculo da tensão de cedência de secções da Classe 4
$k_{2,\theta}$	fator de redução da tensão de cedência do aço à temperatura atingida no instante t
$k_{E,\theta}$	fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura do aço θ_a atingida no instante t
$k_{y,\theta}$	fator de redução da tensão de cedência do aço à temperatura atingida no instante t
l	comprimento a 20°C
W_{eff}	módulo de flexão efetivo
W_{pl}	módulo de flexão plástico
$M_{b,Rd}$	momento resistente da secção transversal
M_{Rk}	momento resistente característico da secção transversal
M_{cr}	momento critico

Caracteres do alfabeto grego

Δl	alongamento induzido pela temperatura
$\varepsilon_{0.2p,\theta}$	extensão total correspondente a $f_{p0.2,\theta}$
ε	extensão, fator que depende de f_y
$\varepsilon_{u,\theta}$	extensão última
θ	temperatura
θ_a	temperatura do aço
λ_a	condutibilidade térmica do aço inoxidável
$\bar{\lambda}_{p,\theta}$	esbelteza a temperaturas elevadas
σ	tensão
χ_{fi}	fator de redução para a encurvadura por flexão em situação de incêndio

Capítulo 1

Introdução

Introdução

- 1.1 Enquadramento geral
- 1.2 Características gerais do aço inoxidável
- 1.3 Motivação e objetivos
- 1.4 Estrutura da dissertação

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

A presente dissertação apresenta o estudo desenvolvido no âmbito da resistência ao fogo de elementos estruturais em aço inoxidável, realizado em paralelo com o estágio curricular na empresa Arestalfer, S.A.

1.2 Características gerais do aço inoxidável

À tipologia de aço resistentes à corrosão e ao calor dá-se o nome de aço inoxidável. Este contém na sua composição química, no mínimo, 10,5% de cromo. Assim como existem diferentes classes de aço carbono com diferentes requisitos de resistência, soldabilidade e tenacidade, também existem diferentes variedades de aços inoxidáveis, com diferentes níveis de resistência mecânica e de resistência à corrosão. Os aços inoxidáveis são divididos em grupos dependendo da adição de elementos liga, que modificam as propriedades mecânicas e resistência a diferentes ambientes corrosivos sendo, por isso, importante a adequada escolha do aço mediante a sua aplicação futura (SCI, 2017).

Assim, e tal como referido anteriormente, o aço inoxidável pode ser dividido em cinco grupos:

- Austeníticos: possuem entre 17% a 18% de cromo e 8 a 11% de níquel. Para além de apresentarem uma boa resistência à corrosão, têm grande ductilidade, boa soldabilidade e são facilmente deformáveis a frio, sendo por isso, o grupo mais utilizado na construção.
- Ferríticos: têm entre 10.5% a 18% de cromo, contendo uma percentagem muito baixa de níquel, fazendo com que a sua estrutura atômica seja semelhante à dos aços carbono. As suas características químicas fazem com que apresente custos mais baixos que os aços do grupo austenítico com a mesma classe de resistência à corrosão, mas são em geral, menos dúcteis e têm menos soldabilidade. Este tipo de aço tem aplicação em zonas interiores e exteriores com condições atmosféricas amenas.
- Duplex ou austeníticos-ferríticos: têm uma microestrutura entre a austenite e a ferrite e contêm entre 20% a 26% de cromo e 1 a 8% de níquel. Por terem uma menor quantidade de níquel que outras classes de aços austeníticos, apresentam custos mais baixos. Possuem uma resistência mecânica aproximadamente duas

vezes superior à dos aços austeníticos em condições recozidas o que possibilita a utilização de secções mais reduzidas. Este pode ser um fator benéfico em estruturas onde o peso próprio seja um fator importante, como é o caso das plataformas offshore ou pontes, sendo apropriados para ambientes corrosivos. Apresentam boa ductilidade quando comparados com os austeníticos, mas são menos deformáveis devido a sua alta resistência, têm boa soldabilidade e boa resistência à fissuração causada por corrosão.

- Martensíticos: estes aços são menos dúcteis e mais suscetíveis a fendas do que os aços do grupo ferrítico, austenítico e duplex. São, por isso, usados em situações onde a sua resistência ao desgaste, abrasão e dureza possam ser aproveitados como, por exemplo, em instrumentos cirúrgicos, talheres ou pás de turbinas. A sua soldabilidade é limitada por requererem tratamentos a quente pré e pós soldadura.
- Endurecidos por precipitação: com 18% de crómio e 8% de níquel na sua composição, têm, em geral, uma resistência à corrosão melhor que a dos aços martensíticos e semelhante à dos austeníticos. São usados em aplicações que requerem materiais com elevada resistência mecânica e moderadas resistências à corrosão como na indústria aeroespacial, podendo ser usados também em barras à tração, cabos e parafusos. Devido às suas características, os aços dos grupos martensíticos e endurecidos por precipitação não são de uso comum na construção.

As muitas vantagens do aço inoxidável face ao aço carbono, fazem com que seja um material com cada vez mais aplicações na construção civil.

A resistência à corrosão é a principal vantagem e motivo para a maioria das aplicações estruturais do aço inoxidável. A percentagem de crómio determina o quão resistente o aço pode ser em ambientes corrosivos. Um aço inoxidável com elevadas percentagens de crómio poderá ser empregue em ambientes em contacto com soluções ácidas ou alcalinas enquanto que aços com percentagens mais baixas podem ser utilizados em ambientes expostos à atmosfera ou em contacto com água sem sofrer corrosão.

Esta resistência à corrosão é ainda acompanhada de uma característica única chamada de *self-repair* ou regeneração. Este fenómeno deve-se a uma camada superficial formada espontaneamente por óxidos de crómio que ocorre quando entra em contacto com o ar ou outro elemento oxidante (Figura 1). Assim, mesmo que o aço inoxidável sofra algum risco ou outro dano superficial, esta camada passiva regenerar-se-á instantaneamente não

necessitando, portanto, de nenhuma proteção contra a corrosão para permanecer com aspeto brilhante mesmo depois de décadas de uso (Euro Inox, 2002).

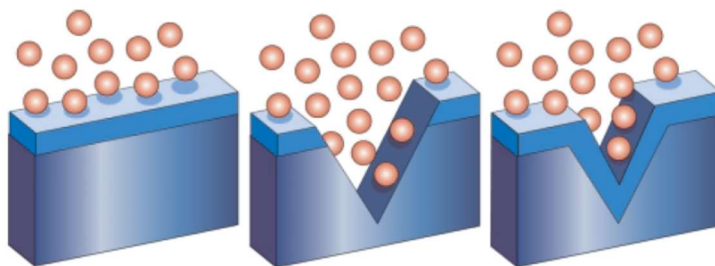


Figura 1 Mecanismo de regeneração do aço inoxidável (Euro Inox, 2002)

A excelente resistência do aço inoxidável à corrosão faz com que seja menos frequente a necessidade de inspeções e custos, reduzindo assim a necessidade de manutenção e aumentando a vida útil da estrutura (SCI, 2017).

O facto de o aço inoxidável não necessitar de uma camada anticorrosão facilita a manutenção dos seus elementos, uma vez que não será necessário proceder a reparações caso a camada seja danificada como ocorre com elementos de aço carbono.

A ductilidade no aço inoxidável diminui com o teor de carbono, o que significa que este tem uma ductilidade superior à do aço carbono. Assim, o seu comportamento em situações que apliquem esta características, como no caso da resistência a ações sísmicas, tenderá a ser melhor.

A presença de cromo na constituição do aço inoxidável, para além de ser benéfica para a corrosão, é também importante na sua resistência a altas temperaturas. A sua resistência a altas temperaturas é a razão, depois das suas propriedades corrosivas, pela qual os aços inoxidáveis são escolhidos em detrimento do aço carbono, podendo-se encontrar diversas aplicações em que esta resistência é importante como, por exemplo, na indústria química ou de centrais de inceneração de resíduos.

A aparência estética é também uma vantagem face a outros materiais pois a superfície com aspeto espelhado e a fácil manutenção do aço inoxidável fazem com que seja um material de aparência moderna e atrativa.

O aço inoxidável usado na construção contém uma grande percentagem de matérias recicláveis e reciclados, o que permite que no final da sua vida útil possa ser totalmente reciclado sem perder qualidade. Um estudo internacional recente feito pela *International Stainless Steel Forum* (ISSF) determinou que cerca de 92% do aço inoxidável usado em

aplicações arquitetónicas e na construção é recuperado e reciclado no final do seu ciclo de vida. A reciclabilidade do aço inoxidável, aliada às mencionadas anteriormente, contribui para uma construção mais sustentável sendo que o seu ciclo de vida longo contribui para a redução do uso de recursos naturais (SSINA, 2010).

A empresa finlandesa *Outokumpu* refere que usando metais recuperados de resíduos e subprodutos de produção, permite atingir uma percentagem de 87% de aço inoxidável produzido com conteúdo reciclado, sendo que a média da indústria a nível mundial andará na casa dos 60% (Outokumpu, 2018).

Outro aspeto importante e que torna o aço inoxidável um produto “amigo do ambiente” prende-se com o facto de não requerer revestimento superficial que se poderia deteriorar e provocar contaminação ambiental (SSINA, 2010).

As desvantagens que podem ser apontadas ao aço inoxidável são os preços elevados em comparação com o aço carbono, como se pode observar na Figura 2, no registo mais recente, placas em aço inoxidável 1.4301 são 3.5 vezes mais caras que as em aço carbono e, placas em aço inoxidável 1.4401 têm um custo 5.3 vezes superior ao aço carbono. A disponibilidade limitada de secções no mercado e a soldabilidade podem ser também apontadas como desvantagens dado que, sendo o aço inoxidável uma liga metálica, é necessário ter especial cuidado quanto à técnica de soldadura a ser usada bem como o material enchimento (Kotecki & Armao, 2003).

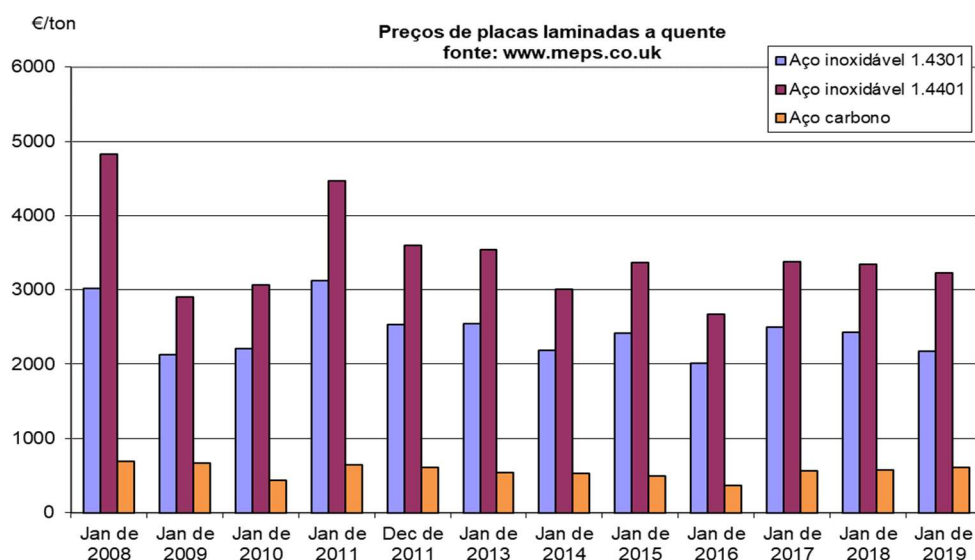


Figura 2 Evolução dos preços do aço inoxidável 1.4301 e 1.4401 e aço carbono (Lopes, 2019)

1.3 Motivação e objetivos do estudo acadêmico

Nos últimos anos, tem-se observado um aumento no uso de aço inoxidável em edifícios, principalmente, devido às suas propriedades corrosivas e longa vida útil. O aço inoxidável é dividido em cinco grupo distintos, diferenciados pela sua composição química. Dentro desses grupos de aço inoxidável, as classes de aços ferríticos e austenítico-ferríticos, caracterizados por terem menor percentagem de níquel na sua composição, resultam num custo mais baixo quando comparados as classes aços inoxidáveis austeníticos. Estas classes têm resistência comparável ou até maior que o aço carbono e boa resistência à corrosão a um custo menor (Rossi, 2014).

Um dos aspetos mais importantes a avaliar no desempenho de estruturas em aço inoxidável é o comportamento em situação de incêndio, pois quando sujeito temperaturas elevadas, apresenta instabilidade que se traduz num comportamento mecânico não linear. Uma elevada condutividade térmica permite uma propagação rápida da temperatura, o que se traduz na degradação das suas propriedades mecânicas principais.

Quando comparado com o aço carbono, utilizar aço inoxidável pode, em algumas situações e recorrendo-se a análises de cálculo avançadas, abdicar do uso de materiais de proteção contra incêndio (Azevedo, 2017).

A Parte 1-4 do Eurocódigo 3, EN 1993-1-4 (CEN, 2006a), é utilizada para a análise da resistência do aço inoxidável, referindo as regras de cálculo estrutural para elementos estruturais à temperatura normal. Para a avaliação de resistência ao fogo, é usada a Parte 1-2 do mesmo Eurocódigo, EN 1993-1-2 (CEN, 2005b). O facto de ser prescrita uma verificação igual para aço inoxidável e aço de carbono, apesar destes terem leis constitutivas em situação de incêndio diferentes, como consta no Anexo C da EN 1993-1-2 (CEN, 2005b), revela a necessidade de estudos neste âmbito.

Diversos estudos sobre estruturas de aço inoxidável têm sido desenvolvidos nos últimos anos, resultando em novas propostas de cálculo, desenvolvidas por especialistas como Leroy Gardner ou Enrique Mirambell (Gardner, 2005) (Real & Mirambell, 2003).

Assim, o estudo a ser levado a cabo, apresentado neste relatório, pretende analisar a influência de diferentes comportamentos mecânicos na resistência última, comparando as metodologias previstas no Eurocódigo 3 com a proposta de revisão do EC3, apresentada pelo CEN TC 250/SC 3/WG 2 (Eurocode 3 Part 1-2).

Para atingir o objetivo proposto, a metodologia adotada será usar como ferramenta o programa de cálculo SAFIR, de modo a obter simulações numéricas que possam ser comparadas e discutidas.

Por fim, realiza-se um exemplo de cálculo de uma aplicação estrutural em aço inoxidável, aplicando conceitos do estudo acadêmico a um caso prático tratado no estágio.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação foi dividida em 6 capítulos, sendo que o primeiro contém o enquadramento geral, as características do aço inoxidável, a motivação e objetivos e a estrutura do documento.

O Capítulo 2 apresenta exemplos de aplicação do aço inoxidável na construção civil.

No Capítulo 3 são abordadas as propriedades mecânicas do aço inoxidável, segundo o Eurocódigo 3 e segundo a proposta de revisão e ainda a adaptação feita às curvas das leis constitutivas.

O Capítulo 4 trata da resistência estrutural ao fogo, apresentando as regras de cálculo e os resultados obtidos para o estudo realizado com elementos finitos de viga, com lei constitutiva unidimensional, não se abordando encurvadura local.

No Capítulo 5 é apresentado um exemplo de cálculo de uma aplicação estrutural em aço inoxidável de uma escada tratada no âmbito do estágio curricular, aplicando conceitos do estudo acadêmico.

O Capítulo 6 contém as principais conclusões retiradas no decorrer do estudo, bem como desenvolvimentos futuros.

Este trabalho conta ainda com um anexo onde se apresenta todo o trabalho desenvolvido no âmbito do estágio curricular.

Capítulo 2

Aplicações na construção

,

Aplicações na construção

- 2.1 Considerações gerais
- 2.2 Exemplos de aplicações não estruturais
- 2.3 Exemplos de aplicações estruturais
- 2.4 Considerações finais

2. APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO

2.1 Considerações gerais

Desde que foi criado, há mais de 100 anos, o aço inoxidável tem sido usado na construção por ser apropriado para aplicação em edifícios situados em ambientes agressivos, como áreas costeiras, instalações *offshore*, instalações nucleares ou instalações químicas.

Os tipos mais comuns de aço inoxidável usados em aplicações estruturais são os dos grupos austenítico, austenítico-ferríticos e ferríticos devido às suas características. Na Tabela 1 são apresentadas as classes de aços inoxidáveis mais usuais, segundo a Parte 1-4 do Eurocódigo³, sendo que, destas, apenas a classe 1.4003 dos ferríticos, as classes 1.4301, 1.4401, 1.4404 e 1.4571 dos austeníticos e a classe 1.4462 dos austeníticos-ferríticos são referenciadas na Parte 1-2 do Eurocódigo 3 (CEN, 2005b).

Tabela 1 Tipos de aço inoxidável mais usados e respectivas classes (CEN, 2006a)

Tipos de aço inoxidável	Classes
Ferríticos	1.4003, 1.4016, 1.4512
Austeníticos	1.4306, 1.4307, 1.4541, 1.4301, 1.4401, 1.4404, 1.4539, 1.4571, 1.4432, 1.4435, 1.4311, 1.4406, 1.4439, 1.4529, 1.4547, 1.4318
Austeníticos-ferríticos	1.4362, 1.4462

2.2 Exemplos de aplicações não estruturais

As paredes verdes ou *green walls* são uma solução construtiva, cada vez mais usada, trazendo grandes benefícios para os edifícios em que são aplicadas. Para além de ajudar a melhorar a qualidade térmica dos edifícios e reduzir as transições sonoras vindas do exterior, em termos ambientais, melhora a qualidade do ar, ajuda na prevenção de cheias e ainda traz benefícios para a qualidade de vida, pois espaços verdes em meio urbano ajudam a reduzir níveis de stress.

Usar cabos de aço inoxidável ou redes por onde plantas trepadeiras se possam fixar proporciona uma alternativa às paredes verdes tradicionais sendo que, implementar uma solução destas numa estrutura existente pode ser facilmente conseguido.

Na Figura 3 encontra-se ilustrado um exemplo do uso de aço inoxidável em paredes verdes, onde se tira partido das suas características de corrosão.

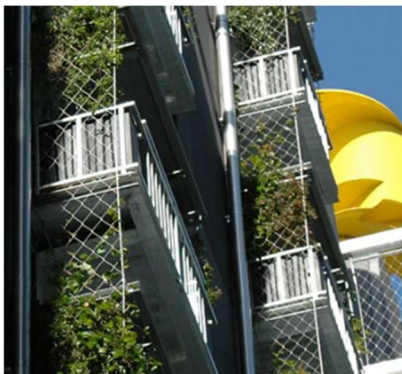


Figura 3 Exemplo do uso de aço inoxidável em paredes verdes (Rostan Tensile Architecture, 2018)

O aço inoxidável apresenta boas características para ser usado em coberturas uma vez que, é um material bastante durável que requer pouca manutenção, podendo ser usado, por exemplo, em edifícios expostos a vento marítimos ou que tenham um tempo de vida útil longo.

Uma aplicação em que pode ser benéfico empregar aço inoxidável é em coberturas verdes, à semelhança do que acontece com as paredes verdes.

O Chrysler Building, (Figura 4), foi contruído em 1930 e a sua cobertura, em aço inoxidável, nunca foi sujeita a nenhum processo de reparação e teve apenas duas operações de limpeza, uma em 1961 e a última em 1995 (Outokumpu, 2014).



Figura 4 Chrysler Building, Nova Iorque, EUA (Outokumpu, 2014)

O aço inoxidável é ainda abundantemente utilizado em fachadas por ser apelativo do ponto de vista estético, apresentar elevada durabilidade e não requerer uma manutenção especial.

Na Figura 5 é apresentado um dos muitos exemplos do uso de aço inoxidável. Neste caso é o edifício habitacional localizado em Zollhof, Düsseldorf na Alemanha.



Figura 5 Edifício habitacional em Düsseldorf, Alemanha (Helzel, 2002)

2.3 Exemplos de aplicações estruturais

Para a biblioteca do Parlamento indiano (Figura 6), foi usado aço inoxidável em componentes estruturais, por motivos de enquadramento na envolvente e pelas suas características de resistência à corrosão (SCI, 2011).

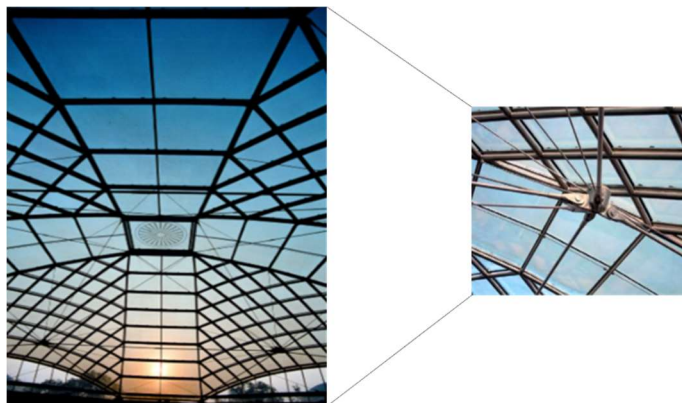


Figura 6 Parliament Library Building Domes, Nova Deli, Índia e pormenor de uma ligação (SCI, 2011)

Uma aplicação estrutural em que o aço inoxidável é muito utilizado é em pontes, principalmente em pontes pedestres.

Para a ponte pedestre Newcastle Memorial Walk (Figura 7), a escolha do aço inoxidável para a sua construção deve-se à necessidade de um material com boa durabilidade e boas características de corrosão, pois devido à proximidade com a linha de costa.



Figura 7 Ponte pedestre Newcastle Memorial Walk Newcastle, Austrália (Pilcher, 2015)

O aço inoxidável é também, muitas vezes, empregue em aeroportos e outras estações de transporte.

Um exemplo estrutural em que foi usado este material é no caso da expansão do aeroporto de Tóquio no Japão (Figura 8). A escassez de terreno fez com que uma pista de aterragem tivesse de ser construída sobre o oceano. A estrutura de suporte foi realizada em aço inoxidável por ser a opção economicamente mais viável mantendo a qualidade desejada (ISSF, 2016).



Figura 8 Aeroporto Internacional de Haneda, Tóquio, Japão (ISSF, 2016)

Outro exemplo de aplicação estrutural do aço inoxidável pode ser encontrado no Aeroporto Francisco Sá Carneiro, no Porto, em Portugal. Na Figura 9 encontra-se um pormenor da implementação de aço inoxidável neste aeroporto.



Figura 9 Aeroporto Francisco Sá Carneiro, Porto, Portugal

As termas de São Pedro do Sul, em Portugal, situadas na margem do rio Vouga a cerca de 500 metros da nascente de água termal, são de fundação romana e classificadas como Monumento Nacional desde 1938. Desde a sua construção foram um espaço utilizado, mas na década de 80 do século passado o abandono e degradação tiveram início, passado a servir

de armazém de barcos (Ribeiro, 2017). Os sinais das utilizações que foram dadas ao espaço estão marcados na estrutura, mas a estrutura romana inicial prevaleceu. O projeto de reabilitação e conservação teve como objetivo recuperar o edifício com o mínimo de intervenção possível.

Sendo este um espaço onde o teor de humidade e exposição da estrutura à água é permanente, para esta reabilitação foi escolhido usar aço inoxidável nas novas estruturas de reforço. Todos os elementos metálicos utilizados neste projeto deverão ser em aço inoxidável do tipo austenítico 1.4404.



Figura 10 Obras de reabilitação das termas de São Pedro do Sul (Gazeta da Beira, 2018)

A caixilharia da Fundação Champalimaud, localizada em Lisboa, é um exemplo da escolha de aço inoxidável em ambiente corrosivo e na Figura 11 pode-se visualizar a utilização deste material.



Figura 11 Fundação Champalimaud (Neves, 2019)

Também o Farol da Ponta dos Capelinhos (Figura 12), na ilha do Fail, Açores, que foi alvo de obras de reabilitação no ano de 2005, contou com uma nova cúpula em vidro e aço inoxidável.



Figura 12 Farol da Ponta dos Capelinhos (Wikipedia, 2015)

Diversos outros exemplos de aplicação do aço inoxidável na construção podem ainda ser encontrados em Portugal pois, devido à extensa linha de costa e o seu ambiente corrosivo para o aço carbono, encontram-se edifícios onde a utilização de aço inoxidável foi a opção considerada.

2.4 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas diversas aplicações que o aço inoxidável pode ter na construção civil.

Pode-se aferir, assim o papel cada vez mais relevante que o aço inoxidável tem em elementos estruturais, onde se tira proveito das inúmeras vantagens que este apresenta face ao uso de aço carbono.

Capítulo 3

Propriedades mecânicas do aço inoxidável a temperaturas elevadas

Propriedades mecânicas do aço inoxidável a temperaturas elevadas

- 3.1 Considerações gerais
- 3.2 Lei constitutiva segundo o Eurocódigo 3
- 3.3 Lei constitutiva segundo a proposta de revisão do Eurocódigo 3
- 3.4 Adaptação das curvas das leis constitutivas
- 3.5 Considerações finais

3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO INOXIDÁVEL A TEMPERATURAS ELEVADAS

3.1 Considerações gerais

Um dos aspectos que diferencia o comportamento do aço carbono do do aço inoxidável é a sua relação tensão-extensão. O aço inoxidável apresenta um comportamento não linear sem que tenha uma extensão de cedência bem definida, enquanto que o aço carbono tem um comportamento elástico-linear, atingindo uma tensão de cedência e um patamar de cedência antes de sofrer endurecimento por deformação (SCI, 2017).

O aço inoxidável ainda é um material pouco utilizado em elementos estruturais devido ao desconhecimento sobre as suas características e o uso que lhe pode ser dado. Disto resulta que a sua lei constitutiva seja alvo de estudos que pretendem melhorar a abordagem proposta no EC3.

3.2 Lei constitutiva segundo o Eurocódigo 3

Para aços inoxidáveis dos quais são conhecidas as propriedades mecânicas a altas temperaturas, são apresentados valores característicos na Tabela 2, para perfis laminados a quente. A tensão de cedência, f_y , o módulo de elasticidade, E , e a tensão última, f_u , à temperatura ambiente, são valores dados pela Parte 1-4 do EC3 (CEN, 2006a).

Tabela 2 Valores nominais de tensão de cedência, tensão última de cedência e módulo de elasticidade para aço inoxidável estrutural (CEN, 2006a)

Tipo	Classe	Tensão de cedência f_y (MPa)		Tensão última f_u (MPa)		Módulo de Elasticidade E (GPa)
		$t \leq 12\text{mm}$	$t \leq 75\text{mm}$	$t \leq 12\text{mm}$	$t \leq 75\text{mm}$	
Austenítico	1.4301	210		520		200
	1.4401	220		530	520	200
	1.4404	220		530	520	200
	1.4571	220		540	520	200
Ferrítico	1.4003	280	250	450		220
Austenítico-ferrítico	1.4462	460		660	640	200

Tanto para o aço carbono como para o aço inoxidável, o coeficiente de Poisson é 0.3, e o módulo de distorção é calculado pela expressão:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (3.1)$$

A Parte 1-4 do EC3 (CEN, 2006a) apenas menciona a resistência ao fogo de elementos estruturais em aço inoxidável remetendo para a Parte 1-2 do mesmo (CEN, 2005b). Devido à sua natureza acidental, em situação de incêndio, deformações maiores do que as que

ocorrem à temperatura ambiente são aceitáveis. Assim, a Parte 1-2 sugere que a temperaturas elevadas, θ_a , se use como tensão de cedência a tensão correspondente a uma extensão total de 2%, sendo $f_{y,\theta} = f_{2\%,\theta}$, para secções de classes 1, 2 e 3, e o limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, $f_{y,\theta} = f_{0.2p,\theta}$, para classe 4.

A relação tensão-extensão a altas temperaturas do aço inoxidável é necessária para determinar a capacidade de carga de uma estrutura em situação de incêndio. Tanto a temperaturas elevadas com à temperatura ambiente, as mudanças nas propriedades mecânicas do aço podem ser determinadas por ensaios de tração e flexão (Lopes, 2009).

A proposta do Anexo C da Parte 1-2 do EC3 (CEN, 2005b) para a relação tensão-extensão prevê que esta possa ser determinada pelo parâmetros descritos na Tabela 3.

Tabela 3 Expressões para determinar a relação tensão-extensão para aço inoxidável a temperaturas elevadas (CEN, 2005b)

Domínio de extensões	Tensão σ	Módulo tangente E_t
$\varepsilon \leq \varepsilon_{c,\theta}$	$\frac{E \cdot \varepsilon}{1 + a \cdot \varepsilon^b}$	$\frac{E \cdot (1 + a \cdot \varepsilon^b - a \cdot b \cdot \varepsilon^b)}{(1 + a \cdot \varepsilon^b)^2}$
$\varepsilon_{c,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{0.2p,\theta} - e + (d/c) \sqrt{c^2 - (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon)^2}$	$\frac{d \cdot (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon)}{c \sqrt{c^2 - (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon)^2}}$
Parâmetros	$\varepsilon_{c,\theta} = f_{0.2p,\theta} / E_{a,\theta} + 0,002$	
	$a = \frac{E_{a,\theta} \varepsilon_{c,\theta} - f_{0.2p,\theta}}{f_{0.2p,\theta} \varepsilon_{c,\theta}^b}$	$b = \frac{(1 - \varepsilon_{c,\theta} E_{ct,\theta} / f_{0.2p,\theta}) E_{a,\theta} \varepsilon_{c,\theta}}{(E_{a,\theta} \varepsilon_{c,\theta} / f_{0.2p,\theta} - 1) f_{0.2p,\theta}}$
Funções	$c^2 = (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta}) \left(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta} + \frac{e}{E_{ct,\theta}} \right)$	$d^2 = e(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta}) E_{ct,\theta} + e^2$
	$e = \frac{(f_{u,\theta} - f_{0.2p,\theta})^2}{(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta}) E_{ct,\theta} - 2(f_{u,\theta} - f_{0.2p,\theta})}$	

Por observação da Figura 13, em que se mostra a relação tensão-extensão do aço inoxidável, é possível distinguir duas zonas do gráfico. Na primeira zona observa-se um comportamento da relação tensão-extensão quase linear até atingir um limite de proporcionalidade e a segunda zona é uma curva que termina quando se atinge a tensão de rotura à tração.

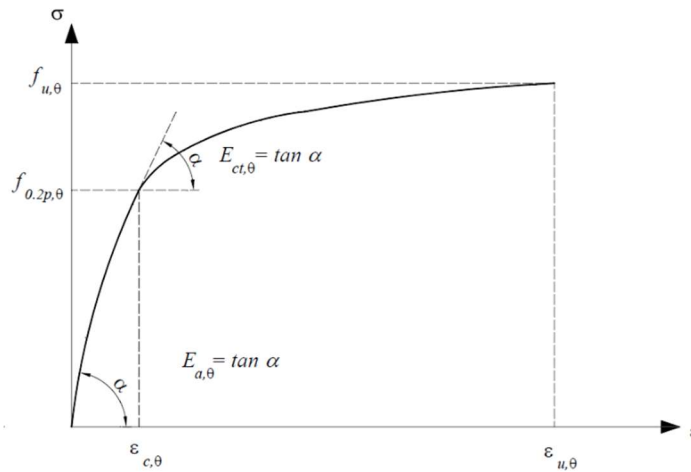


Figura 13 Relação tensão-extensão do aço inoxidável a temperaturas elevadas (CEN, 2005b)

Esta relação tensão-extensão do aço inoxidável a temperaturas elevadas pode ser usada para determinar a resistência dos elementos em situação de incêndio. Assim como acontece no aço carbono, o aço inoxidável também sofre uma redução significativa das suas propriedades mecânicas quando é sujeito a temperaturas elevadas, sendo que no caso deste as reduções serão diferentes para cada classe de aço.

Na Figura 14 e na Figura 15 é apresentada uma comparação entre o fator de redução do módulo de elasticidade e tensão de cedência de aço carbono e aço inoxidável estrutural a temperaturas elevadas, para as classes presentes no EC3, em que, $k_{E,\theta} = E_{\alpha,\theta} / E$ e $k_{0.2p,\theta} = f_{0.2p,\theta} / f_{\theta}$ (Lopes & Vila Real, 2014).

A variação do fator de redução do módulo de elasticidade, $k_{E,\theta}$, com a temperatura mantém-se em todas as classes de aço inoxidável. A Figura 14 retrata a comparação desta propriedade entre aço inoxidável e o aço de carbono. É de destacar que, a temperaturas elevadas, o aço inoxidável exibe um comportamento mecânico muito melhor, no módulo de elasticidade, do que o aço carbono.

Por análise da Figura 15, a variação do fator de redução correspondente à tensão limite de proporcionalidade, para a classe 1.4003 de aço inoxidável, a única classe de aço inoxidável do grupo ferrítico referida no EC3, a temperaturas elevadas tem comportamento diferente das restantes classes (Lopes & Vila Real, 2014).

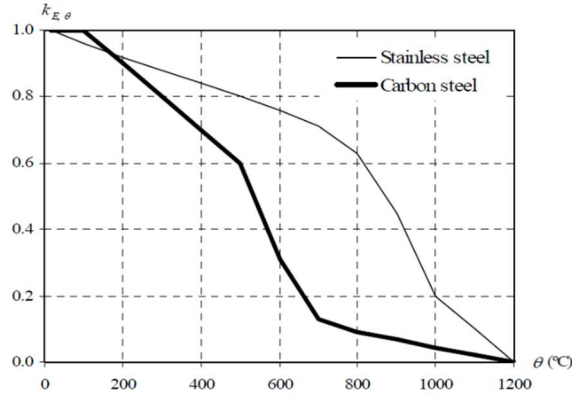
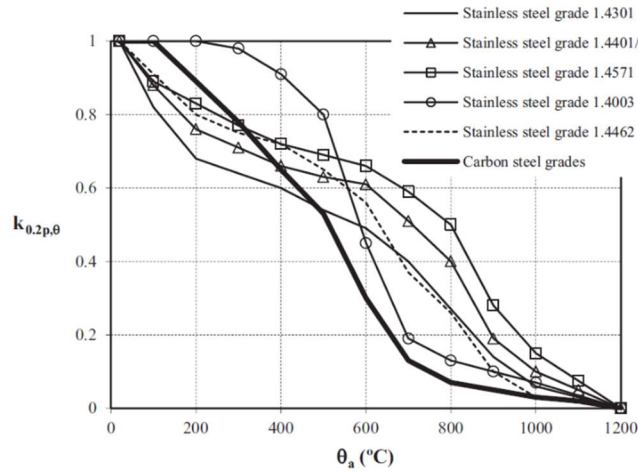

 Figura 14 Comparação do fator de redução $k_{E,\theta}$ entre o aço inoxidável e o aço carbono


Figura 15 Comparação entre o fator de redução do módulo de elasticidade, a temperaturas elevadas, de algumas classes de aço inoxidável e aço carbono

3.3 Lei constitutiva segundo a proposta de revisão do Eurocódigo 3

A proposta de revisão do Eurocódigo 3 apresentada em setembro de 2018 pretende substituir o Anexo C da Parte 1-2 do EC3 (CEN, 2005b), passando as extensões a serem calculadas pelas expressões que se apresentam em baixo, em função de um intervalo de tensão.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_{\theta}} + 0,002 \left[\frac{\sigma}{f_{0.2p,\theta}} \right]^{n_{\theta}} \quad \text{para } \sigma \leq f_{0.2p,\theta} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma - f_{0.2p,\theta}}{E_{0.2p,\theta}} + \left(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{0.2p,\theta} - \frac{f_{u,\theta} - f_{0.2p,\theta}}{E_{0.2p,\theta}} \right) \left(\frac{\sigma - f_{0.2p,\theta}}{f_{u,\theta} - f_{0.2p,\theta}} \right)^{m_{\theta}} + \varepsilon_{0.2p,\theta} \quad \text{para } f_{0.2p,\theta} < \sigma \leq f_{u,\theta} \quad (3.3)$$

Com:

$$\varepsilon_{u,\theta} = 1 - \frac{f_{2,\theta}}{f_{u,\theta}} \quad \text{para aços inoxidáveis dos grupos austenítico e duplex} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_{u,\theta} = 0,6 \left(1 - \frac{f_{2,\theta}}{f_{u,\theta}} \right) \quad \text{para aço inoxidável do grupo ferrítico} \quad (3.5)$$

n_θ e m_θ são os expoentes que definem o grau de não-linearidade do material à temperatura θ :

$$m_\theta = \frac{\ln \left(\frac{0,02 - \varepsilon_{0,2p,\theta} - \frac{f_{2,\theta} - f_{0,2p,\theta}}{E_{p0,2,\theta}}}{\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{0,2p,\theta} - \frac{f_{u,\theta} - f_{0,2p,\theta}}{E_{0,2p,\theta}}} \right)}{\ln \left(\frac{f_{2,\theta} - f_{0,2p,\theta}}{f_{u,\theta} - f_{0,2p,\theta}} \right)} \quad \begin{array}{l} \text{com } 1,5 \leq m_\theta \leq 5 \text{ para todos os tipos de} \\ \text{aço inoxidável} \end{array} \quad (3.6)$$

Os valores para o expoente n_θ podem ser tomados como iguais aos valores de n para temperatura ambiente:

- $n=7$ para aços inoxidáveis do grupo austenítico
- $n=8$ para aço inoxidável do grupo duplex
- $n=14$ para aços inoxidáveis do grupo ferrítico

Da aplicação das fórmulas anteriores, resulta o gráfico da Figura 16, que traduz a nova lei constitutiva apresentada na proposta de revisão do EC3.

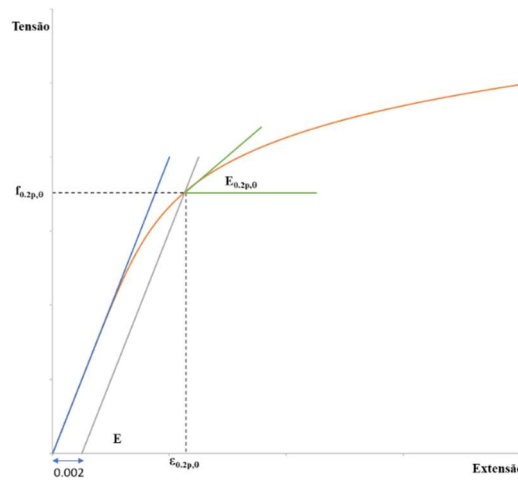


Figura 16 Relação tensão-extensão do aço inoxidável a temperaturas elevadas

Na Figura 17, encontra-se representada, para a temperatura de 500°C, a lei constitutiva, segundo o EC3 e segundo a proposta de revisão ao mesmo, para diferentes grupos de aço inoxidável, sendo possível observar as diferenças que a nova proposta de lei constitutiva introduzirá.

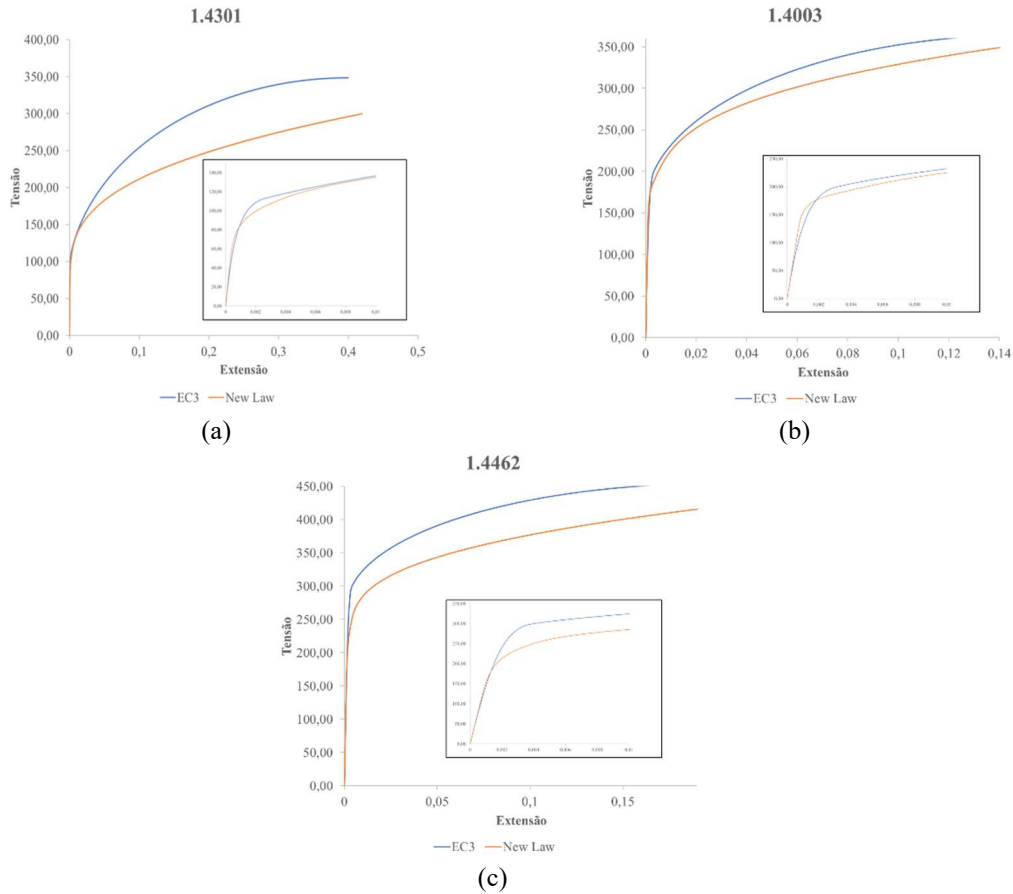


Figura 17 Comparação entre a lei constitutiva apresentada no EC3 e a proposta de revisão, para 500°C

Outra alteração que esta proposta apresenta é mudanças nos valores tabelados no Anexo C da Parte 1-2 para o fator de redução do módulo de elasticidade, $k_{E,\theta}$, para o aço inoxidável da classe 1.4003. Uma comparação entre os valores atualmente usados e os que passarão a ser utilizados é feita na Figura 18.

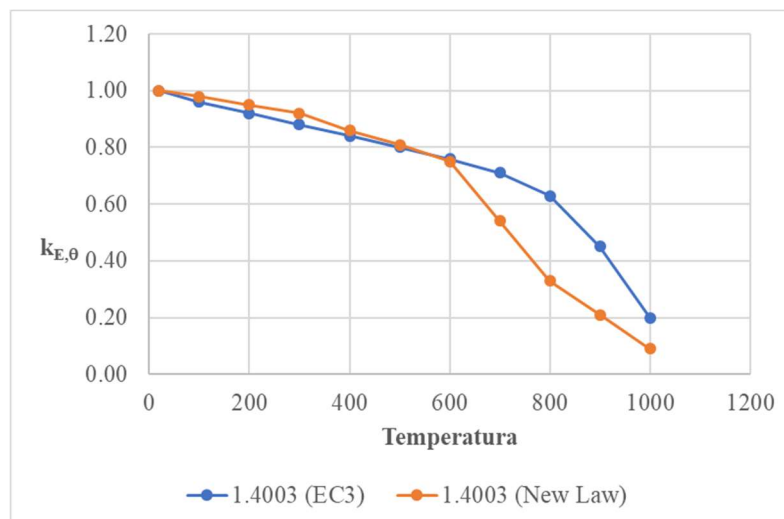


Figura 18 Comparação entre o fator $k_{E,\theta}$ para o aço inoxidável da classe 1.4003, segundo o EC3 e a nova proposta

3.4 Adaptação das curvas das leis constitutivas

Dado que, o programa SAFIR está construído para usar a curva da lei constitutiva do EC3, para que pudesse ser usado neste estudo, foi necessário adaptar a curva de forma a conseguir uma aproximação à lei constitutiva proposta para a nova geração do EC3.

A aproximação entre as duas curvas foi conseguida através da alteração de três parâmetros comuns às duas leis constitutivas (EC3 e proposta de revisão do EC3), nomeadamente, módulos de elasticidade, E , tensão de cedência a 20°C, f_y , e de tensão de rotura, f_u . De modo a obter as melhores aproximações possíveis, foi aplicado o método dos mínimos múltiplos quadrados com auxílio do programa MATLAB. Para isso, foram criados ficheiros no programa com todos os parâmetros de entrada das curvas a aproximar. Na Figura 19 encontra-se um excerto dos dados que foram necessários inserir para construir a curva da lei constitutiva correspondente à nova geração do EC3.

```

EDITOR | PUBLISH | VIEW
Single | LeftRight | Table Position | None | Left | Right | Top | Bottom | Expand | Collapse | Expand All | Collapse All | Highlight current line | Show line numbers | Highlight Requirements | Enable tooltips while editing |
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
MMDQM | DQ_antiga_nova | f_antiga |
1 - T = 0;
2 - classe = 1.4003;
3 - switch classe
4 - case 1.4003
5 - fy = 210;
6 - fu = 520;
7 - switch T
8 - case 400
9 - k20 = 0.78;
10 - k020 = 0.66;
11 - k020p = 0.55;
12 - E0 = 160000;
13 - m0 = 2.4243492;
14 - E020 = 8263.543003;
15 - n0=7;
16 - case 500
17 - k20 = 0.73;
18 - k020 = 0.61;
19 - k020p = 0.5;
20 - E0 = 160000;
21 - m0 = 2.57189166;
22 - E020 = 7361.94302;
23 - n0=7;
24 - case 600
25 - k20 = 0.68;
26 - k020 = 0.54;
27 - k020p = 0.45;
28 - E0 = 160000;
29 - m0 = 2.4243492;
30 - E020 = 8263.543003;
31 - n0=7;
32 - case 700
33 - k20 = 0.63;
34 - k020 = 0.5;
35 - k020p = 0.4;
36 - E0 = 160000;
37 - m0 = 2.4243492;
38 - E020 = 8263.543003;
39 - n0=7;
40 - case 800
41 - k20 = 0.58;
42 - k020 = 0.45;
43 - k020p = 0.35;
44 - E0 = 160000;
45 - m0 = 2.4243492;
46 - E020 = 8263.543003;
47 - n0=7;
48 - case 900
49 - k20 = 0.53;
50 - k020 = 0.4;
51 - k020p = 0.3;
52 - E0 = 160000;
53 - m0 = 2.4243492;
54 - E020 = 8263.543003;
55 - n0=7;
56 - case 1000
57 - k20 = 0.48;
58 - k020 = 0.35;
59 - k020p = 0.25;
60 - E0 = 160000;
61 - m0 = 2.4243492;
62 - E020 = 8263.543003;
63 - n0=7;
64 - case 1100
65 - k20 = 0.43;
66 - k020 = 0.3;
67 - k020p = 0.2;
68 - E0 = 160000;
69 - m0 = 2.4243492;
70 - E020 = 8263.543003;
71 - n0=7;
72 - case 1200
73 - k20 = 0.38;
74 - k020 = 0.25;
75 - k020p = 0.15;
76 - E0 = 160000;
77 - m0 = 2.4243492;
78 - E020 = 8263.543003;
79 - n0=7;
80 - end
81 - end
82 - end
83 - end
84 - end
85 - end
86 - end
87 - end
88 - end
89 - end
90 - end
91 - end
92 - end
93 - end
94 - end
95 - end
96 - end
97 - end
98 - end
99 - end
100 - end
101 - end
102 - end
103 - end
104 - end
105 - end
106 - end
107 - end
108 - end
109 - end
110 - end
111 - end
112 - end
113 - end
114 - end
115 - end
116 - end
117 - end
118 - end
119 - end
120 - end
121 - end
122 - end
123 - end
124 - end
125 - end
126 - end
127 - end
128 - end
129 - end
130 - end
131 - end
132 - end
133 - end
134 - end
135 - end
136 - end
137 - end
138 - end
139 - end
140 - end
141 - end
142 - end
143 - end
144 - end
145 - end
146 - end
147 - end
148 - end
149 - end
150 - end
151 - end
152 - end
153 - end
154 - end
155 - end
156 - end
157 - end
158 - end
159 - end
160 - end
161 - end
162 - end
163 - end
164 - end
165 - end
166 - end
167 - end
168 - end
169 - end
170 - end
171 - end
172 - end
173 - end
174 - end
175 - end
176 - end
177 - end
178 - end
179 - end
180 - end
181 - end
182 - end
183 - end
184 - end
185 - end
186 - end
187 - end
188 - end
189 - end
190 - end
191 - end
192 - end
193 - end
194 - end
195 - end
196 - end
197 - end
198 - end
199 - end
200 - end
201 - end
202 - end
203 - end
204 - end
205 - end
206 - end
207 - end
208 - end
209 - end
210 - end
211 - end
212 - end
213 - end
214 - end
215 - end
216 - end
217 - end
218 - end
219 - end
220 - end
221 - end
222 - end
223 - end
224 - end
225 - end
226 - end
227 - end
228 - end
229 - end
230 - end
231 - end
232 - end
233 - end
234 - end
235 - end
236 - end
237 - end
238 - end
239 - end
240 - end
241 - end
242 - end
243 - end
244 - end
245 - end
246 - end
247 - end
248 - end
249 - end
250 - end
251 - end
252 - end
253 - end
254 - end
255 - end
256 - end
257 - end
258 - end
259 - end
260 - end
261 - end
262 - end
263 - end
264 - end
265 - end
266 - end
267 - end
268 - end
269 - end
270 - end
271 - end
272 - end
273 - end
274 - end
275 - end
276 - end
277 - end
278 - end
279 - end
280 - end
281 - end
282 - end
283 - end
284 - end
285 - end
286 - end
287 - end
288 - end
289 - end
290 - end
291 - end
292 - end
293 - end
294 - end
295 - end
296 - end
297 - end
298 - end
299 - end
300 - end
301 - end
302 - end
303 - end
304 - end
305 - end
306 - end
307 - end
308 - end
309 - end
310 - end
311 - end
312 - end
313 - end
314 - end
315 - end
316 - end
317 - end
318 - end
319 - end
320 - end
321 - end
322 - end
323 - end
324 - end
325 - end
326 - end
327 - end
328 - end
329 - end
330 - end
331 - end
332 - end
333 - end
334 - end
335 - end
336 - end
337 - end
338 - end
339 - end
340 - end
341 - end
342 - end
343 - end
344 - end
345 - end
346 - end
347 - end
348 - end
349 - end
350 - end
351 - end
352 - end
353 - end
354 - end
355 - end
356 - end
357 - end
358 - end
359 - end
360 - end
361 - end
362 - end
363 - end
364 - end
365 - end
366 - end
367 - end
368 - end
369 - end
370 - end
371 - end
372 - end
373 - end
374 - end
375 - end
376 - end
377 - end
378 - end
379 - end
380 - end
381 - end
382 - end
383 - end
384 - end
385 - end
386 - end
387 - end
388 - end
389 - end
390 - end
391 - end
392 - end
393 - end
394 - end
395 - end
396 - end
397 - end
398 - end
399 - end
400 - end
401 - end
402 - end
403 - end
404 - end
405 - end
406 - end
407 - end
408 - end
409 - end
410 - end
411 - end
412 - end
413 - end
414 - end
415 - end
416 - end
417 - end
418 - end
419 - end
420 - end
421 - end
422 - end
423 - end
424 - end
425 - end
426 - end
427 - end
428 - end
429 - end
430 - end
431 - end
432 - end
433 - end
434 - end
435 - end
436 - end
437 - end
438 - end
439 - end
440 - end
441 - end
442 - end
443 - end
444 - end
445 - end
446 - end
447 - end
448 - end
449 - end
450 - end
451 - end
452 - end
453 - end
454 - end
455 - end
456 - end
457 - end
458 - end
459 - end
460 - end
461 - end
462 - end
463 - end
464 - end
465 - end
466 - end
467 - end
468 - end
469 - end
470 - end
471 - end
472 - end
473 - end
474 - end
475 - end
476 - end
477 - end
478 - end
479 - end
480 - end
481 - end
482 - end
483 - end
484 - end
485 - end
486 - end
487 - end
488 - end
489 - end
490 - end
491 - end
492 - end
493 - end
494 - end
495 - end
496 - end
497 - end
498 - end
499 - end
500 - end
501 - end
502 - end
503 - end
504 - end
505 - end
506 - end
507 - end
508 - end
509 - end
510 - end
511 - end
512 - end
513 - end
514 - end
515 - end
516 - end
517 - end
518 - end
519 - end
520 - end
521 - end
522 - end
523 - end
524 - end
525 - end
526 - end
527 - end
528 - end
529 - end
530 - end
531 - end
532 - end
533 - end
534 - end
535 - end
536 - end
537 - end
538 - end
539 - end
540 - end
541 - end
542 - end
543 - end
544 - end
545 - end
546 - end
547 - end
548 - end
549 - end
550 - end
551 - end
552 - end
553 - end
554 - end
555 - end
556 - end
557 - end
558 - end
559 - end
560 - end
561 - end
562 - end
563 - end
564 - end
565 - end
566 - end
567 - end
568 - end
569 - end
570 - end
571 - end
572 - end
573 - end
574 - end
575 - end
576 - end
577 - end
578 - end
579 - end
580 - end
581 - end
582 - end
583 - end
584 - end
585 - end
586 - end
587 - end
588 - end
589 - end
590 - end
591 - end
592 - end
593 - end
594 - end
595 - end
596 - end
597 - end
598 - end
599 - end
600 - end
601 - end
602 - end
603 - end
604 - end
605 - end
606 - end
607 - end
608 - end
609 - end
610 - end
611 - end
612 - end
613 - end
614 - end
615 - end
616 - end
617 - end
618 - end
619 - end
620 - end
621 - end
622 - end
623 - end
624 - end
625 - end
626 - end
627 - end
628 - end
629 - end
630 - end
631 - end
632 - end
633 - end
634 - end
635 - end
636 - end
637 - end
638 - end
639 - end
640 - end
641 - end
642 - end
643 - end
644 - end
645 - end
646 - end
647 - end
648 - end
649 - end
650 - end
651 - end
652 - end
653 - end
654 - end
655 - end
656 - end
657 - end
658 - end
659 - end
660 - end
661 - end
662 - end
663 - end
664 - end
665 - end
666 - end
667 - end
668 - end
669 - end
670 - end
671 - end
672 - end
673 - end
674 - end
675 - end
676 - end
677 - end
678 - end
679 - end
680 - end
681 - end
682 - end
683 - end
684 - end
685 - end
686 - end
687 - end
688 - end
689 - end
690 - end
691 - end
692 - end
693 - end
694 - end
695 - end
696 - end
697 - end
698 - end
699 - end
700 - end
701 - end
702 - end
703 - end
704 - end
705 - end
706 - end
707 - end
708 - end
709 - end
710 - end
711 - end
712 - end
713 - end
714 - end
715 - end
716 - end
717 - end
718 - end
719 - end
720 - end
721 - end
722 - end
723 - end
724 - end
725 - end
726 - end
727 - end
728 - end
729 - end
730 - end
731 - end
732 - end
733 - end
734 - end
735 - end
736 - end
737 - end
738 - end
739 - end
740 - end
741 - end
742 - end
743 - end
744 - end
745 - end
746 - end
747 - end
748 - end
749 - end
750 - end
751 - end
752 - end
753 - end
754 - end
755 - end
756 - end
757 - end
758 - end
759 - end
760 - end
761 - end
762 - end
763 - end
764 - end
765 - end
766 - end
767 - end
768 - end
769 - end
770 - end
771 - end
772 - end
773 - end
774 - end
775 - end
776 - end
777 - end
778 - end
779 - end
780 - end
781 - end
782 - end
783 - end
784 - end
785 - end
786 - end
787 - end
788 - end
789 - end
790 - end
791 - end
792 - end
793 - end
794 - end
795 - end
796 - end
797 - end
798 - end
799 - end
800 - end
801 - end
802 - end
803 - end
804 - end
805 - end
806 - end
807 - end
808 - end
809 - end
810 - end
811 - end
812 - end
813 - end
814 - end
815 - end
816 - end
817 - end
818 - end
819 - end
820 - end
821 - end
822 - end
823 - end
824 - end
825 - end
826 - end
827 - end
828 - end
829 - end
830 - end
831 - end
832 - end
833 - end
834 - end
835 - end
836 - end
837 - end
838 - end
839 - end
840 - end
841 - end
842 - end
843 - end
844 - end
845 - end
846 - end
847 - end
848 - end
849 - end
850 - end
851 - end
852 - end
853 - end
854 - end
855 - end
856 - end
857 - end
858 - end
859 - end
860 - end
861 - end
862 - end
863 - end
864 - end
865 - end
866 - end
867 - end
868 - end
869 - end
870 - end
871 - end
872 - end
873 - end
874 - end
875 - end
876 - end
877 - end
878 - end
879 - end
880 - end
881 - end
882 - end
883 - end
884 - end
885 - end
886 - end
887 - end
888 - end
889 - end
890 - end
891 - end
892 - end
893 - end
894 - end
895 - end
896 - end
897 - end
898 - end
899 - end
900 - end
901 - end
902 - end
903 - end
904 - end
905 - end
906 - end
907 - end
908 - end
909 - end
910 - end
911 - end
912 - end
913 - end
914 - end
915 - end
916 - end
917 - end
918 - end
919 - end
920 - end
921 - end
922 - end
923 - end
924 - end
925 - end
926 - end
927 - end
928 - end
929 - end
930 - end
931 - end
932 - end
933 - end
934 - end
935 - end
936 - end
937 - end
938 - end
939 - end
940 - end
941 - end
942 - end
943 - end
944 - end
945 - end
946 - end
947 - end
948 - end
949 - end
950 - end
951 - end
952 - end
953 - end
954 - end
955 - end
956 - end
957 - end
958 - end
959 - end
960 - end
961 - end
962 - end
963 - end
964 - end
965 - end
966 - end
967 - end
968 - end
969 - end
970 - end
971 - end
972 - end
973 - end
974 - end
975 - end
976 - end
977 - end
978 - end
979 - end
980 - end
981 - end
982 - end
983 - end
984 - end
985 - end
986 - end
987 - end
988 - end
989 - end
990 - end
991 - end
992 - end
993 - end
994 - end
995 - end
996 - end
997 - end
998 - end
999 - end
1000 - end

```

Figura 19 Ficheiro de introdução de dados para a lei constitutiva da nova geração do EC3

Os resultados foram apresentados pelo programa através de gráficos, para que se tivesse uma real perceção do que estava a ser calculado pelo mesmo e de forma numérica como pode ser observado na Figura 20.

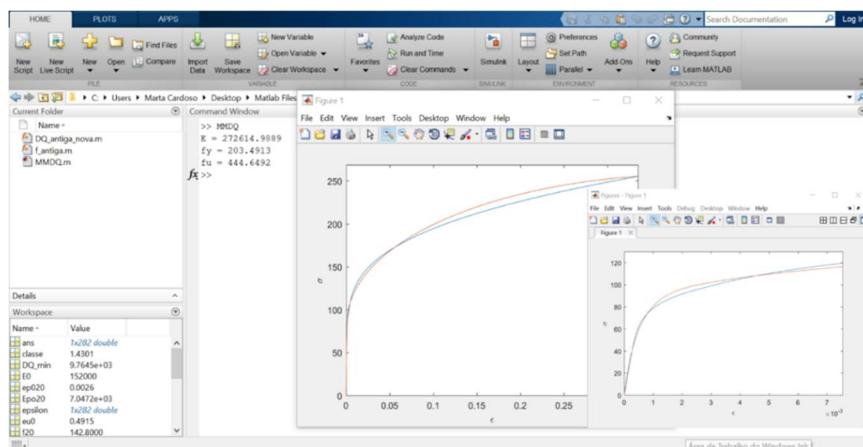


Figura 20 Exemplo dos resultados obtidos para aproximação das leis constitutivas para a temperatura de 600°C e aço inoxidável da classe 1.4301

Depois de terem sido obtidos valores para todos os casos que se pretendiam estudar, todos os resultados foram inseridos numa folha de cálculo e novamente foram obtidos gráficos de comparação entre a lei constitutiva do EC 3, a lei constitutiva da nova geração do EC3 e a curva desenvolvida para adaptação ao programa SAFIR. Assim, pretendeu-se assegurar que os valores mais tarde obtidos pelo SAFIR fossem o mais perto da realidade e com a máxima precisão possível.

3.4.1 Lei constitutiva para o aço inoxidável 1.4301

Através da aproximação numérica realizada com auxílio do programa MATLAB, foram realizadas curvas de adaptação da lei constitutiva que seriam introduzidas no programa SAFIR.

Na Figura 21 encontra-se a adaptação conseguida para a lei constitutiva do aço inoxidável da classe 1.4301 para as diferentes temperaturas que serão avaliadas. Foi tido em conta que a aproximação das curvas deveria ser na zona aproximadamente elástica tanto para esta classe de aço como para as aproximações que se seguirão.

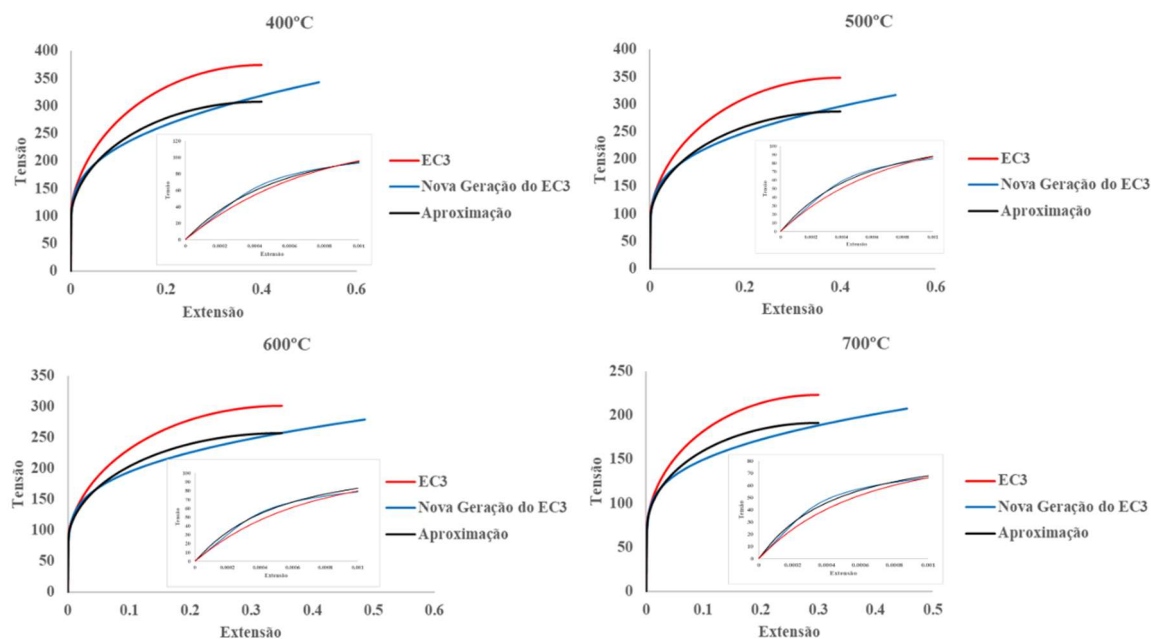


Figura 21 Leis Constitutivas para o aço 1.4301

Da Tabela 4 à Tabela 7 são apresentados os valores tabelados $k_{E,\theta}$, $k_{u,\theta}$ e $k_{y,\theta}$ (ou $k_{2,\theta}$ para a nova geração do EC3) que dão origem à lei constitutiva do aço inoxidável 1.4301.

Tabela 4 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4301 à temperatura de 400°C

	$k_{E,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{y,\theta}$ ou $k_{2,\theta}$
EC3	0.84	0.72	0.82
Nova geração do EC3		0.66	0.78

Tabela 5 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4301 à temperatura de 500°C

	$k_{E,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{y,\theta}$ ou $k_{2,\theta}$
EC3	0.80	0.67	0.75
Nova geração do EC3		0.61	0.73

Tabela 6 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4301 à temperatura de 600°C

	$k_{E,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{y,\theta}$ ou $k_{2,\theta}$
EC3	0.76	0.58	0.70
Nova geração do EC3		0.54	0.68

Tabela 7 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4301 à temperatura de 700°C

	$k_{E,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{y,\theta}$ ou $k_{2,\theta}$
EC3	0.71	0.43	0.57
Nova geração do EC3		0.40	0.54

3.4.2 Lei constitutiva para o aço inoxidável 1.4462

A representação da adaptação para a lei constitutiva do aço inoxidável de classe 1.4462 está representada na Figura 22.

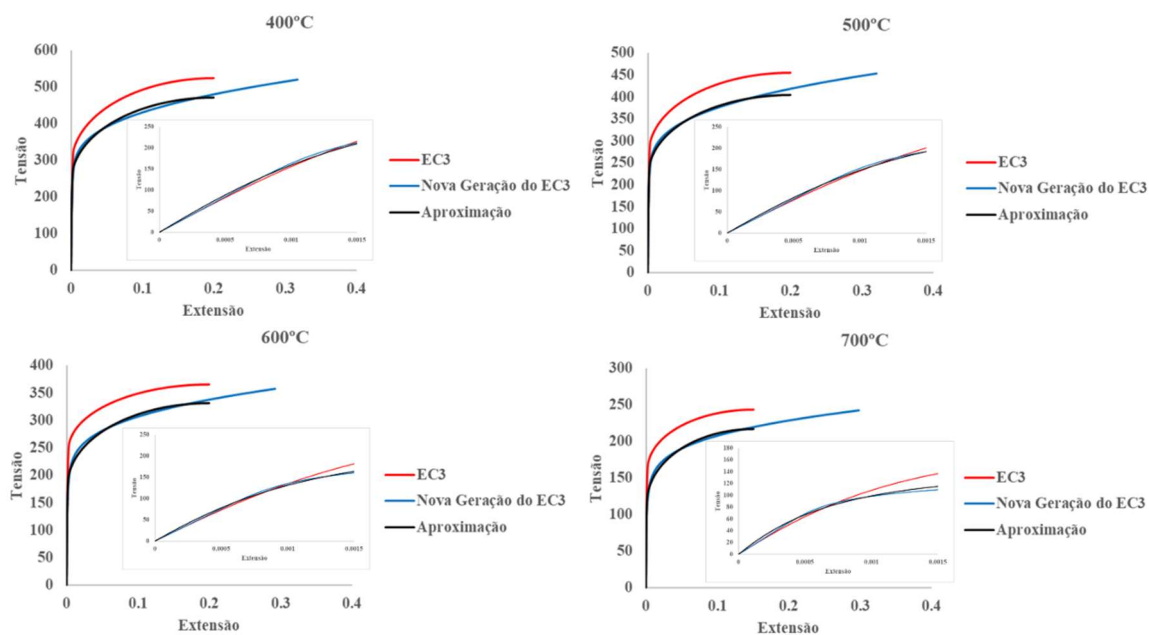


Figura 22 Leis Constitutivas para o aço 1.4462

Os valores tabelados que definem a lei constitutiva do aço inoxidável de classe 1.4462 para as temperaturas a estudar estão enunciados da Tabela 8 à Tabela 11.

Tabela 8 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4462 à temperatura de 400°C

	$k_{E,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{y,\theta}$ ou $k_{2,\theta}$
EC3	0.84	0.82	0.84
Nova geração do EC3			0.76

Tabela 9 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4462 à temperatura de 500°C

	$k_{E,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{y,\theta}$ ou $k_{2,\theta}$
EC3	0.80	0.71	0.75
Nova geração do EC3			0.67

Tabela 10 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4462 à temperatura de 600°C

	$k_{E,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{y,\theta}$ ou $k_{2,\theta}$
EC3	0.76	0.57	0.64
Nova geração do EC3		0.56	0.55

Tabela 11 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4462 à temperatura de 700°C

	$k_{E,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{y,\theta}$ ou $k_{2,\theta}$
EC3	0.71	0.38	0.43
Nova geração do EC3			0.37

3.4.3 Lei constitutiva para o aço inoxidável 1.4003

Para lei constitutiva do aço inoxidável de classe 1.4003, foi mais difícil chegar a adaptações tão próximas como as feitas para as leis anteriores, por ser a que regista maiores diferenças entre o atual EC3 e a nova geração. Na Figura 23 representa a adaptação para zona aproximadamente elástica realizada para cada uma das temperaturas estudadas.

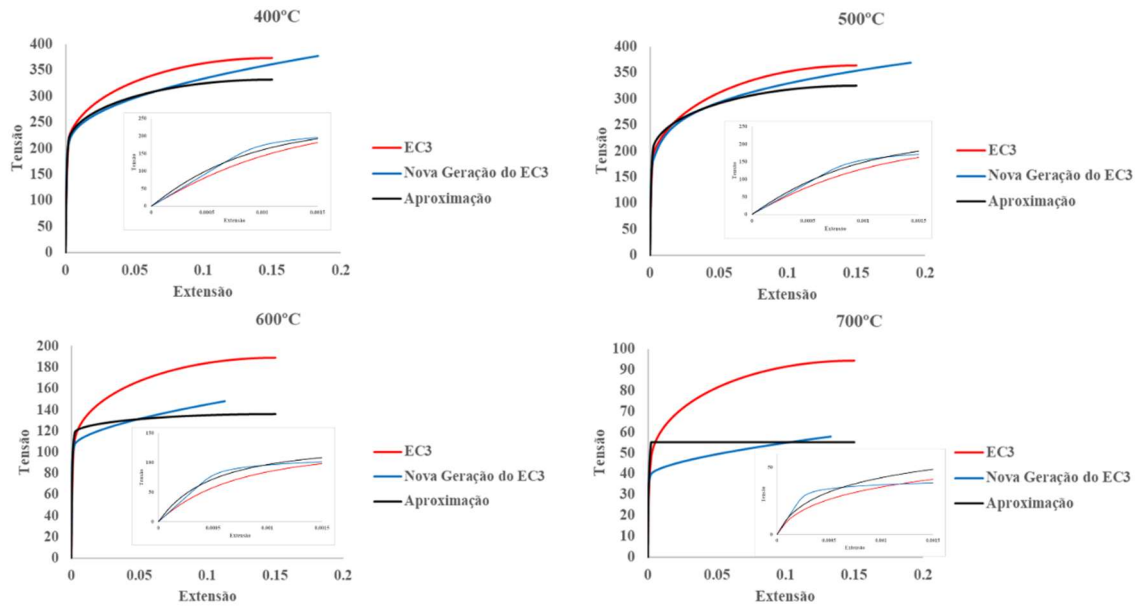


Figura 23 Leis Constitutivas para o aço 1.4003

Devido às diferenças tão acentuadas entre a lei constitutiva do atual EC3 e a sua nova geração para a temperatura de 600°C e 700°C, quando se realiza a aproximação das curvas para a zona aproximadamente elástica não se consegue proximidade na zona plástica. Por conseguinte, foi realizada uma aproximação tendo em vista uma adaptação para a zona plástica como se mostra na Figura 24.

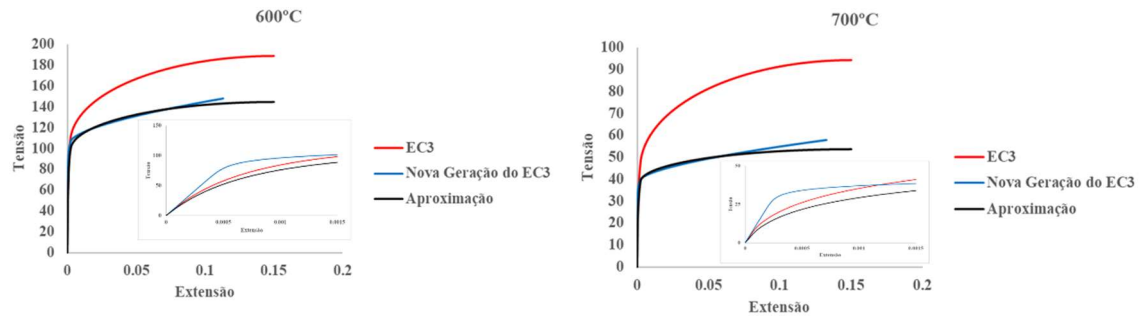


Figura 24 Leis Constitutivas para o aço 1.4003 para as temperaturas de 600°C e 700°C

Para as temperaturas de 400°C a 700°C, as tabelas abaixo apresentam os valores tabelados para a lei constitutiva do aço inoxidável de classe 1.4003 no EC3 e para a sua nova geração.

Tabela 12 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4003 à temperatura de 400°C

	$k_{E,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{y,\theta}$ ou $k_{2,\theta}$
EC3	0.84	0.83	1.16
Nova geração do EC3	0.86	0.84	1.05

Tabela 13 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4003 à temperatura de 500°C

	$k_{E,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{y,\theta}$ ou $k_{2,\theta}$
EC3	0.80	0.81	1.06
Nova geração do EC3	0.81	0.82	1.01

Tabela 14 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4003 à temperatura de 600°C

	$k_{E,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{y,\theta}$ ou $k_{2,\theta}$
EC3	0.76	0.42	0.59
Nova geração do EC3	0.75	0.33	0.48

Tabela 15 Valores tabelados para aço inoxidável de classe 1.4003 à temperatura de 700°C

	$k_{E,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{y,\theta}$ ou $k_{2,\theta}$
EC3	0.71	0.21	0.28
Nova geração do EC3	0.54	0.13	0.18

3.5 Considerações finais

Neste capítulo, foram apresentadas as propriedades mecânicas a temperaturas elevadas do aço inoxidável.

Após se analisar as leis constitutivas que são objeto de estudo, foi necessário realizar uma adaptação da curva proposta para a nova geração da Parte 1-2 do Eurocódigo 3 de modo a que fosse possível o emprego do programa de análise numérica SAFIR dado que, este foi concebido para trabalhar com a lei atual do EC3.

Capítulo 4

Resistência estrutural ao fogo

Resistência estrutural ao fogo

- 4.1 Considerações gerais
- 4.2 Regras de cálculo
- 4.3 Análise numérica
- 4.4 Considerações finais

4. RESISTÊNCIA ESTRUTURAL AO FOGO

4.1 Considerações gerais

Quando submetido a temperaturas elevadas, o aço apresenta um desempenho reduzido. A sua elevada condutividade térmica permite que a temperatura se propague de maneira rápida e que as suas propriedades mecânicas sofram uma drástica degradação. Assim, é fundamental avaliar a resistências de elementos metálicos quando sujeitos a temperaturas elevadas como as ocorridas em situação de incêndio, com objetivo de manter a segurança das estruturas metálicas, salvaguardando pessoas e bens (Vila Real, 2003).

O tempo de exposição do aço a essas temperaturas é um fator crítico na situação de incêndio e os ensaios convencionais realizados não fornecem dados concretos que possam ser usados em projeto (Kosmač, 2012).

As estruturas metálicas tornam-se bastante suscetíveis numa situação de incêndio, assim, e devido as funções que estas não podem deixar de exercer é, portanto, necessário evitar o seu colapso prematuro quando expostas ao fogo (SCI, 2017).

Os estudos realizados sobre o comportamento do aço inoxidável a temperaturas elevadas, demonstram que os aços austeníticos geralmente retêm uma maior proporção da sua resistência mecânica comparativamente ao aço carbono, acima de 500°C. Por outro lado, todos os grupos de aço inoxidável conservam melhor a sua rigidez que o aço carbono para todas as gamas de temperaturas (Kosmač, 2012).

Para verificar a resistência ao fogo, são geralmente usados métodos de cálculo simplificados que se aplicam a elementos individuais e são baseados em hipóteses conservativas.

O EC3 prevê a aplicação de métodos de cálculo avançados baseados em modelos de elementos finitos. Estes modelos permitem dar resposta a problemas complexos, uma vez que permitem reproduzir o comportamento de estruturas tendo em conta a geometria e os materiais que a constituem.

Para aplicação dos métodos de cálculo avançados de modo a obter resultados analíticos das secções estudadas nesta dissertação, foi utilizado o programa de análise SAFIR, considerando elementos finitos viga com lei constitutiva unidimensional.

4.2 Regras de cálculo

Nos subcapítulos seguintes serão apresentadas regras de cálculo para a resistência da secção transversal e do elemento, segundo o Eurocódigo 3 e segundo a sua proposta de revisão.

4.2.1 Resistência da secção

4.2.1.1 Segundo o Eurocódigo 3

Para averiguar a resistência da secção transversal, é necessário primeiro classificá-la.

A classificação da secção transversal (Classe 1 a 4) tem como propósito identificar até que ponto a resistência e a capacidade de rotação da mesma são limitadas pela sua resistência à encurvadura local, o que depende da relação entre a largura e a espessura dos elementos sujeitos a compressão.

Numa secção transversal, é possível que a alma e os banzos sejam de classes diferentes, sendo que a secção é classificada segundo a maior classe obtida.

Segundo o Eurocódigo 3, a temperaturas elevadas é aplicada a secção efetiva calculada para a temperatura ambiente.

Em situação de incêndio, a classificação das secções transversais é feita como para a temperatura ambiente, mas com o valor ε obtido pela expressão:

$$\varepsilon = \left(\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right)^{0.5} \left(\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right)^{0.5} \quad (4.1)$$

A Parte 2 do EC3 (CEN, 2005b) considera que o valor de ε a temperaturas elevadas é dado pela expressão abaixo, não tendo em conta os fatores de redução $k_{E,\theta}$ e $k_{y,\theta}$, valores que reduzem a tensão de cedência e o módulo de elasticidade do aço.

$$\varepsilon = 0.85 \left(\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right)^{0.5} \quad (4.2)$$

Apesar de não ser o mais correto, a constante 0.85 pretende ter em conta as influências devidas ao aumento da temperatura, mas a sua utilização significa considerar que todas as classes de aço inoxidável têm o mesmo valor de tensão de cedência e módulo de elasticidade.

A Figura 25 retrata a constante 0.85 e os valores obtidos pela relação $(k_{E,\theta} / k_{y,\theta})^{0.5}$ para cada classe de aço inoxidável. É importante destacar que o uso desta constante está do lado da segurança, podendo em algumas situações ser demasiado conservativa.

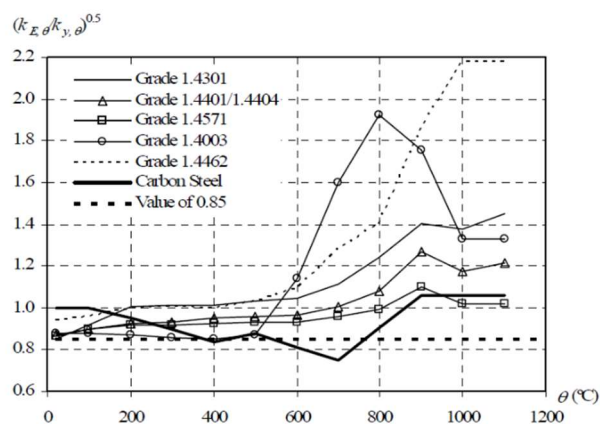


Figura 25 Comparação dos valores da relação $(k_{E,\theta}/k_{y,\theta})^{0.5}$ para cada classe de aço inoxidável com a constante 0,85

Para o cálculo da resistência da secção em situação de incêndio, segundo a Parte 1-2 do EC3, deve ser considerada uma temperatura uniforme na secção, modificando o valor de cálculo da resistência a temperatura normal obtido pelas expressões da Parte 1-1 (CEN, 2005a), para que se tenha em conta propriedades mecânicas do aço a altas temperaturas. Assim, admitindo que a capacidade resistente de um elemento de aço se mantém após um instante t , a condição a ser satisfeita é $E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t}$, onde $E_{fi,d}$ representa o valor de cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio e $R_{fi,d,t}$ representa o valor de cálculo da resistência do elemento, em situação de incêndio, no instante t .

4.2.1.2 Segundo a proposta de revisão do Eurocódigo 3

A proposta de revisão do Eurocódigo 3 (CEN, 2018) refere que os elementos comprimidos da secção transversal devem ser classificados com base na sua esbelteza a temperaturas elevadas.

A classe da secção transversal é considerada esbelta se qualquer um dos seus elementos, alma ou banzo, for classificado como esbelto e, caso contrário, é considerada com não esbelta somente se todos os elementos comprimidos que a constituem assim forem classificados.

A Tabela 16 apresenta as propriedades da secção a serem usadas na determinação da resistência de acordo com a sua classificação.

Tabela 16 Propriedades da secção para determinação da resistência

Classe	Não esbelto	Esbelto
Área da secção A_i	A	A_{eff}
Módulo flexão da secção W_y	$W_{pl,y}$	$W_{eff,y}$
Módulo flexão da secção W_z	$W_{pl,z}$	$W_{eff,z}$

À semelhança do que acontece no atual Eurocódigo 3, nesta proposta é necessário determinar larguras efetivas, sendo que neste caso, serão larguras efetivas de secções classificadas como esbeltas. Na Parte 1-5 do EC3 (CEN, 2006b) são dadas as expressões necessárias para o cálculo da largura efetiva, aplicadas a secções classificadas com classe 4, que têm em conta as reduções de resistência devidas aos efeitos de encurvadura. Nesta proposta, secções classificadas como esbeltas continuam a ter a sua largura efetiva calculada com a Parte 1-5 do EC3, à exceção dos fatores de redução, que terão novas fórmulas em função de serem elementos comprimidos internos ou salientes e dependendo do grupo de aço inoxidável ao qual pertençam.

Tal como acontece no EC3, a proposta de revisão também propõe que para valor de ε a temperaturas elevadas se utilize uma expressão com uma constante de forma a simplificar os cálculos. Na Figura 26, encontra-se um gráfico que representa os valores obtido pela relação $(k_{E,\theta}/k_{y,\theta})^{0.5}$ e a constante que passa a ser 1.00 para aços inoxidáveis dos grupos austenítico I e II, duplex I e II e ferrítico I e, 1.10 para os grupos austenítico III e ferrítico II. É de destacar que esta constante ajusta-se melhor aos valores obtidos pela relação $(k_{E,\theta}/k_{y,\theta})^{0.5}$ para a maioria dos casos, estado do lado da segurança.

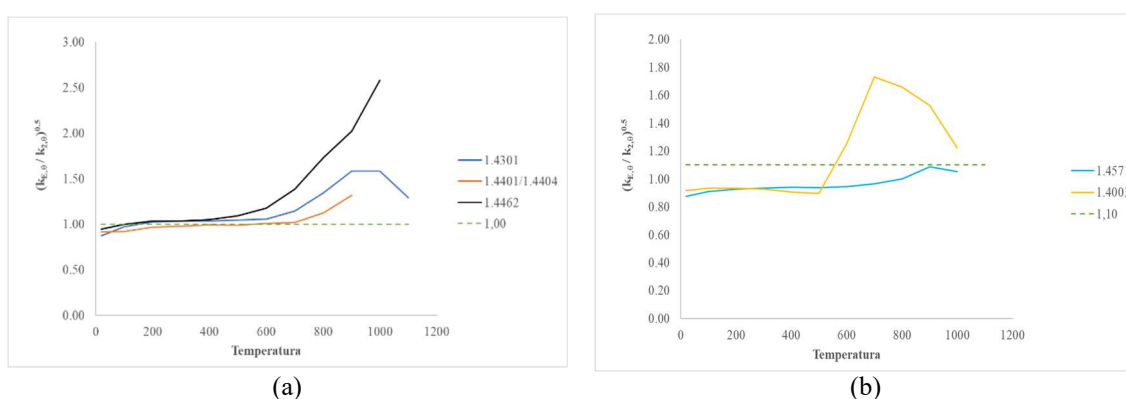


Figura 26 Comparação dos valores da relação $(k_{E,\theta}/k_{y,\theta})^{0.5}$ para cada classe de aço inoxidável com a respetiva constante

Uma das mudanças de cálculo introduzidas pela proposta de revisão ao Eurocódigo 3 é que o fator de redução para a tensão de cedência, $k_{y,\theta}$, seja substituído pelo fator homónimo, $k_{2,\theta}$, que se encontrará tabelado no novo Anexo C da Parte 1-2. Através da

Figura 27, é possível observar um gráfico que retrata as diferenças entre o fator $k_{y,0}$, que consta atualmente no EC3, e o fator $k_{2,0}$, que passará a ser utilizado na proposta de revisão.

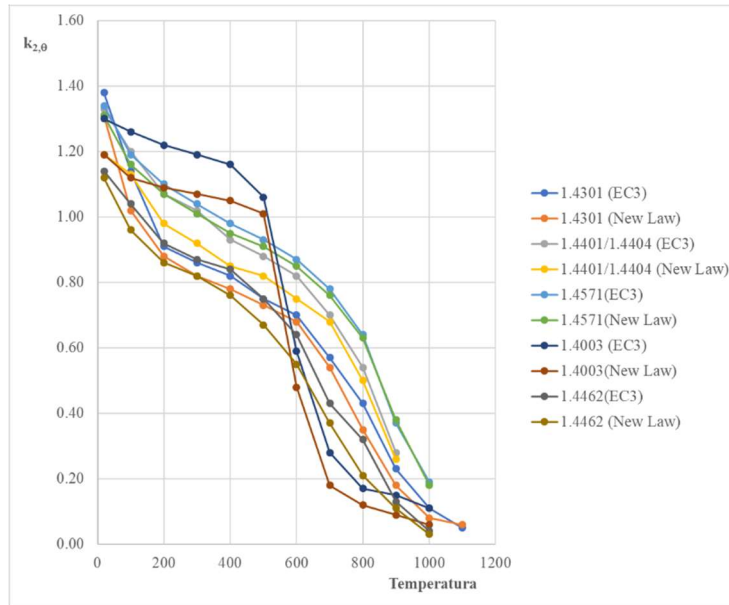


Figura 27 Gráfico de comparação entre o fator $k_{y,0}$ e o fator $k_{2,0}$

4.2.2 Resistência do elemento

4.2.2.1 Segundo o Eurocódigo 3

Adicionalmente à resistência da secção transversal, um fenómeno importante a ter em conta na análise da resistência do elemento é a encurvadura global. Este modo de encurvadura surge em barras longas que não sejam restringidas devidamente. São consideradas barras longas, por exemplo, pilares sujeitos a encurvadura por flexão e vigas sujeitas a encurvadura lateral (Manuel, 2016).

4.2.2.2 Segundo a proposta de revisão do Eurocódigo 3

Para elementos comprimidos, o fator de redução para a encurvadura por flexão em situação de incêndio, χ_{fi} , passa a ter em conta na sua expressão de cálculo, novos parâmetros tabelados, β_0 e α_0 .

Elementos que sofram encurvadura lateral, terão um novo fator de imperfeição a temperaturas elevadas com parâmetros tabelados em função do grupo de aço inoxidável.

Também os elementos sujeitos a flexão composta e compressão terão mudanças nos fatores de interação, k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} e k_{zz} , passando estes a ter valores auxiliares de cálculo tabelados em função do grupo de aço inoxidável.

4.2.3 Comparação entre fórmulas

A proposta de revisão do Eurocódigo 3 propõe alterações às fórmulas de cálculo principalmente no que diz respeito a valores tabelados. De seguida são apresentadas, em forma de comparação, as fórmulas, assim como os valores dos parâmetros α para as várias classes de aço inoxidável em estudo.

As fórmulas usadas para cálculo do esforço axial são apresentadas na Tabela 17 de forma a tornar claras as diferenças que a nova geração do EC3 imporá.

Tabela 17 Fórmulas usadas para o cálculo do esforço axial

	EC3	Nova geração do EC3
$\bar{\lambda}$		$\sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$
$\bar{\lambda}_\theta$	$\bar{\lambda} \cdot (k_{y,\theta} / k_{E,\theta})^{0.5}$	$\bar{\lambda} \cdot (k_{2,\theta} / k_{E,\theta})^{0.5}$
α	$0.65 \sqrt{235 / f_y}$	$\alpha_\theta / \sqrt{k_{2,\theta} / k_{E,\theta}}$ * α_θ valor tabelado
φ_θ	$\frac{1}{2} [1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + (\bar{\lambda}_\theta)^2]$	$\frac{1}{2} [1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + (\beta \bar{\lambda}_\theta)^2]$
χ_{fi}	$\frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}}$	$\frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \beta \bar{\lambda}_\theta^2}}$ * β valor tabelado
$N_{b,rd,\theta}$	$\chi_{fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y$	$\chi_{fi} \cdot A \cdot k_{2,\theta} \cdot f_y$

Para o cálculo dos esforços fletores, as formulações preconizadas no Eurocódigo 3 e na sua nova geração, encontram-se na Tabela 18.

Tabela 18 Fórmulas usadas para o cálculo do esforço de flexão

	EC3	Nova geração do EC3
$\bar{\lambda}_{Lt}$		$\sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}}$
$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT} \cdot (k_{y,\theta} / k_{E,\theta})^{0.5}$	$\sqrt{k_{2,\theta} / k_{E,\theta}} \cdot \bar{\lambda}_{LT}$
α_{LT}	$0.65 \sqrt{235 / f_y}$	$\alpha_{LT,\theta} / \sqrt{k_{2,\theta} / k_{E,\theta}}$ * $\alpha_{LT,\theta}$ valor tabelado
$\varphi_{LT,\theta,com}$	$\frac{1}{2} [1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2]$	$\frac{1}{2} [1 + \alpha_{LT} \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2]$
$\chi_{LT,fi}$	$\frac{1}{\varphi_{LT,\theta,com} + \sqrt{\varphi_{LT,\theta,com}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta,com}^2}}$	$\frac{1}{\varphi_{LT,\theta,com} + \sqrt{\varphi_{LT,\theta,com}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta,com}^2}}$
$M_{b,rd,\theta}$	$\chi_{LT,fi} \cdot W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y$	$\chi_{LT,fi} \cdot W_{pl,y} \cdot k_{2,\theta} \cdot f_y$

A Tabela 19 mostra os valores de α obtidos para o EC3 e a proposta de revisão para aço inoxidável de classe 1.4301 em colunas. É de notar que, para o EC3, o valor de α não sofre qualquer alteração com a variação da temperatura, enquanto que para a proposta de revisão, para cada temperatura haverá um valor diferente de α .

Tabela 19 Valores de α para ambos os eixos e para aço inoxidável de classe 1.4301

α_{EC3}	0.69 (não varia em função da temperatura)
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (400°C)}}$	0.93, com $\alpha_0=0.90$
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (500°C)}}$	0.94, com $\alpha_0=0.90$
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (600°C)}}$	0.95, com $\alpha_0=0.90$
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (700°C)}}$	1.03, com $\alpha_0=0.90$

Os valores de $\alpha_{L,T}$ para o atual EC3 e para a sua nova geração, a qual apresenta valores diferentes para temperaturas diferentes, encontram-se na Tabela 20, para vigas em aço inoxidável do tipo 1.4301.

Tabela 20 Valores de α_{LT} em diferentes condições para aço inoxidável de classe 1.4301

α_{EC3}	0.69 (não varia em função da temperatura)
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (400°C)}}$	0.66
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (500°C)}}$	0.67
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (600°C)}}$	0.68
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (700°C)}}$	0.73

Para colunas em aço inoxidável de classe 1.4462, os valores de α usados encontram-se na Tabela 21 sendo que o valor de β para o eixo yy é igual a 1 e para o eixo zz é 1,5.

Tabela 21 Valores de α para ambos os eixos e para aço inoxidável de classe 1.4462

α_{EC3}	0.46 (não varia em função da temperatura)
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (400°C)}}$	0.58, com $\alpha_0=0.55$
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (500°C)}}$	0.60, com $\alpha_0=0.55$
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (600°C)}}$	0.65, com $\alpha_0=0.55$
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (700°C)}}$	0.76, com $\alpha_0=0.55$

Os valores que o parâmetro α_{LT} assume para o EC3 e a sua nova geração, para vigas, encontram-se na Tabela 22.

Tabela 22 Valores de α_{LT} em diferentes condições para aço inoxidável de classe 1.4462

α_{EC3}	0.46 (não varia em função da temperatura)
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (400°C)}}$	0.47
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (500°C)}}$	0.49
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (600°C)}}$	0.53
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (700°C)}}$	0.62

Para colunas em aço inoxidável de classe 1.4003, a comparação entre os valores de α usados para obtenção dos esforços pelo EC3 e os propostos na sua nova geração encontram-se na Tabela 23. Para a nova geração do EC3 é tido um valor de β de 1 para o eixo yy e 1,5 para o eixo zz.

Tabela 23 Valores de α para ambos os eixos e para aço inoxidável de classe 1.4003

α_{EC3}	0.63 (não varia em função da temperatura)
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (400°C)}}$	0.50, com $\alpha_0=0.55$
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (500°C)}}$	0.49, com $\alpha_0=0.55$
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (600°C)}}$	0.69, com $\alpha_0=0.55$
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (700°C)}}$	0.95, com $\alpha_0=0.55$

Os valores que o parâmetro α_{LT} assume para o EC3 e para a nova geração, para diferentes casos, encontra-se na Tabela 24. Para a nova geração do EC3, o valor tabelado de $\alpha_{LT,0}$ para perfis soldados em aços do grupo ferrítico tem valor igual a 0,40.

Tabela 24 Valores de α_{LT} em diferentes condições para aço inoxidável de classe 1.4003

α_{EC3}	0.60 (não varia em função da temperatura)
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (400°C)}}$	0.36
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (500°C)}}$	0.36
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (600°C)}}$	0.50
$\alpha_{\text{Nova Geração do EC3 (700°C)}}$	0.69

4.3 Análise numérica

4.3.1 Modelação numérica e casos de estudo

O estudo desenvolvido tem como base análise numérica por elementos finitos, recorrendo ao programa SAFIR, para determinar as capacidades de carga última de diferentes secções transversais submetidas esforços de flexão ou compressão.

O programa SAFIR, desenvolvido na Universidade de Liège, na Bélgica, baseado no método de elementos finitos, foi especialmente concebido para análise de estruturas a condição ambiente e a temperaturas elevadas. Pode ser usado para estudar o comportamento de estruturas com uma, duas ou três dimensões e tem em consideração a relação tensão-extensão dos materiais (Franssen & Gernay, 2017).

O cálculo é feito tendo como base um processo incremental, que permite obter deslocamentos em cada nó e esforços nos pontos de integração de cada elemento até que se atinja o colapso da estrutura. As temperaturas escolhidas para esta análise são de 400°C, 500°C, 600°C e 700°C.

De seguida, os resultados determinados a partir de fórmulas do EC3 serão comparados com os obtidos com a proposta de revisão do EC3, para diferentes classes de aço inoxidável.

Na Tabela 25 são apresentadas as secções transversais usadas no estudo de colunas.

Tabela 25 Secções transversais usadas na análise de colunas

Perfil	Classe de aço	Comprimentos
HEA 200	1.4301	
HEB 200	1.4462	L=1m; L=2m; L=3m; L=4m; L=5m; L=6m; L=7m; L=8m; L=10m; L=14m
	1.4003	

A Tabela 26 contém informação sobre as secções transversais usadas para a análise de vigas.

Tabela 26 Secções transversais usadas na análise de vigas

Perfil	Classe de aço	Comprimentos
IPE 220	1.4301	
	1.4462	L=0,5m; L=1m; L=2m; L=3m; L=4m; L=5m; L=6m; L=7m; L=8m; L=10m
	1.4003	

4.3.2 Colunas

4.3.2.1 Aço inoxidável de classe 1.4301

Na Figura 28, mostra-se a comparação entre os resultados numéricos obtidos para esforço axial de um perfil HEA 200, através das fórmulas de cálculo do EC3 e a nova geração do mesmo, para a encurvadura em relação ao eixo forte e, na Figura 29, em relação ao eixo fraco. Estes resultados são obtidos através da adaptação feita às curvas das leis constitutivas, nomeadas no gráfico como SAFIR_Aproximação.

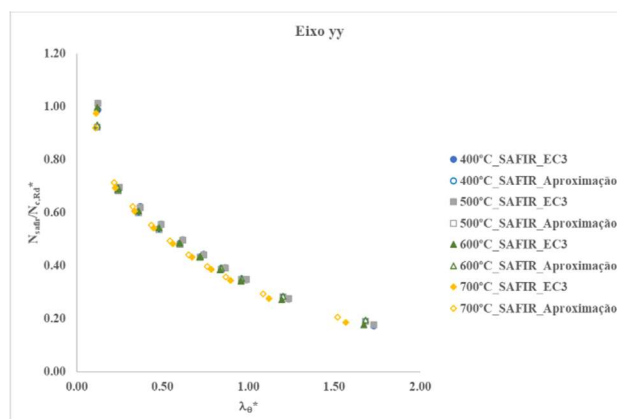


Figura 28 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3 para uma coluna em perfil HEA200 e aço inoxidável 1.4301 no eixo forte

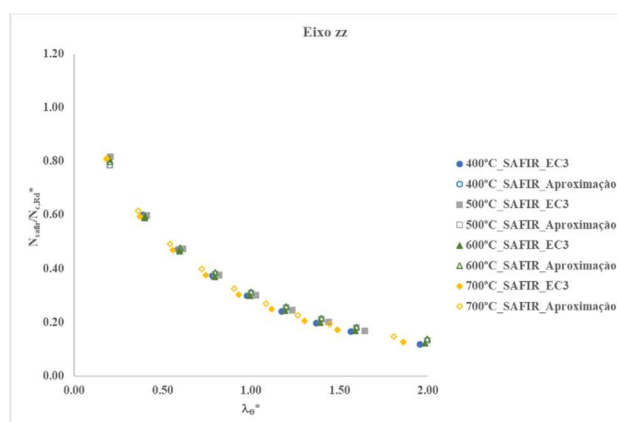


Figura 29 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3 para uma coluna em perfil HEA200 e aço inoxidável 1.4301 no eixo fraco

Para ambos os eixos, tanto os resultados obtidos para o EC3 como os obtidos para a aproximação encontram-se em concordância. Para as temperaturas menores, os resultados desta relação são bastante próximos, sendo que à medida que a temperatura sobe a diferença entre os dois métodos vai-se fazendo notar.

A comparação entre o esforço axial obtido para diferentes comprimentos e diferentes temperaturas, para o EC3 e para a sua nova geração, pode ser observada na Figura 30, para o eixo yy e na Figura 31, para o eixo zz.

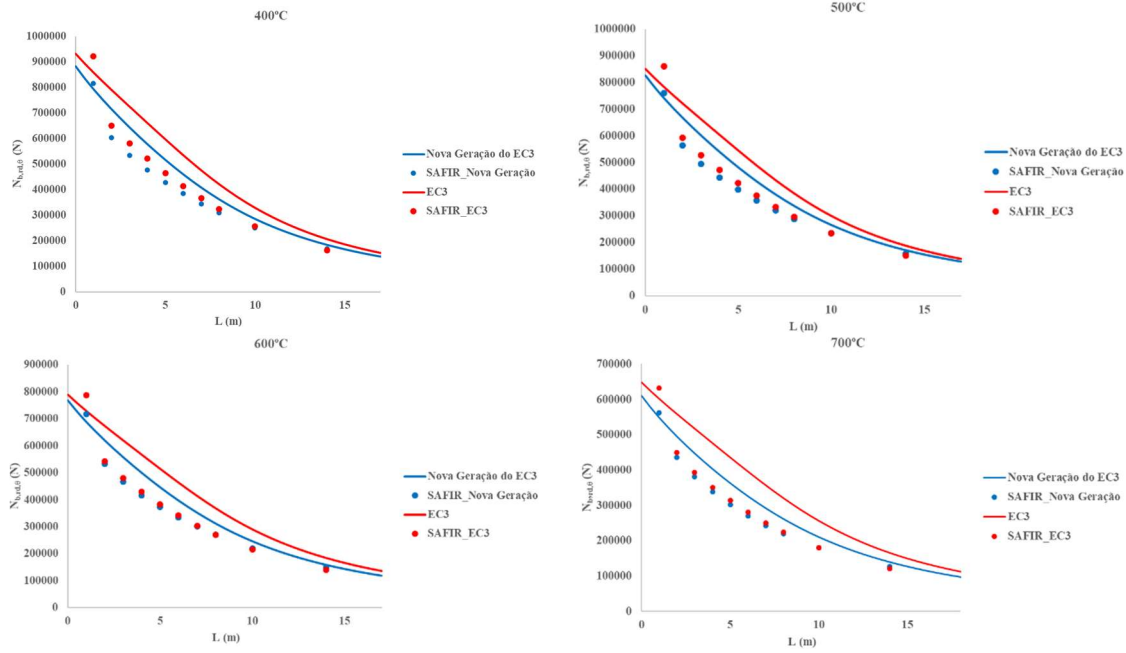


Figura 30 Resultados para o eixo yy em aço inoxidável de classe 1.4301

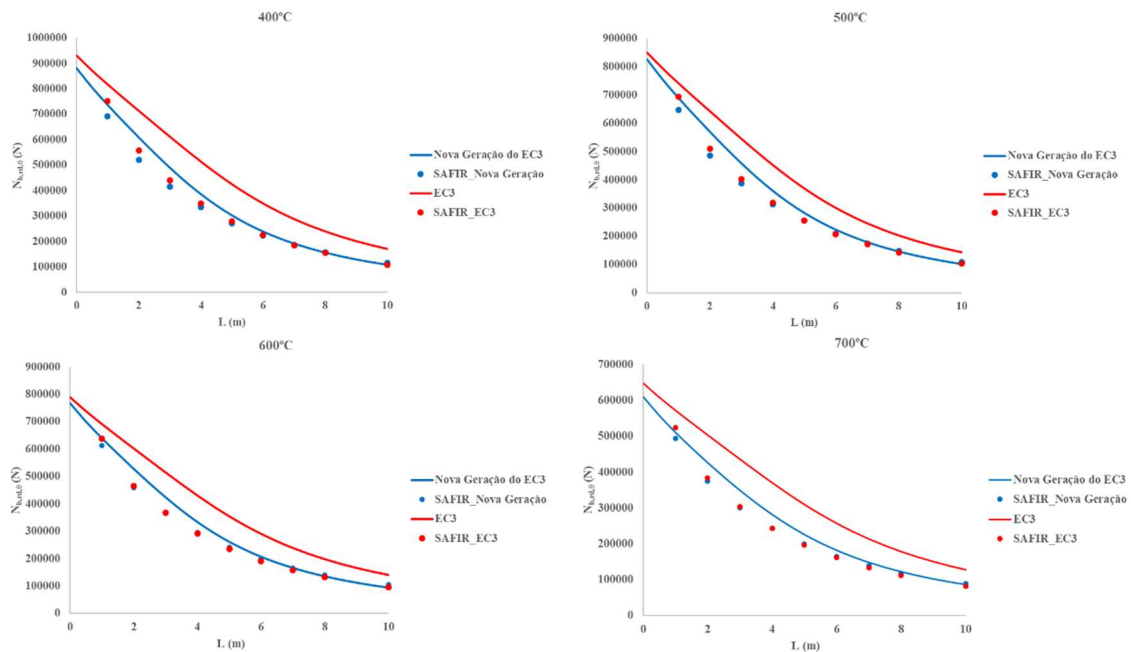


Figura 31 Resultados para o eixo zz em aço inoxidável de classe 1.4301

Pode-se observar que, os resultados obtidos pela aplicação direta das fórmulas de cálculo, a nova geração do EC3 será menos conservativa continuando a estar do lado da segurança. Já os resultados numéricos, obtidos através do programa SAFIR, são bastante semelhantes, ficando cada vez mais próximo a medida que o comprimento e a temperatura da coluna aumentam.

4.3.2.2 Aço inoxidável de classe 1.4462

Para um perfil HEB 200 em aço inoxidável de classe 1.4462, a comparação entre resultados obtidos segundo o atual EC3 e a sua proposta de revisão, são apresentados na Figura 32 e na Figura 33 para o eixo forte e fraco respectivamente.

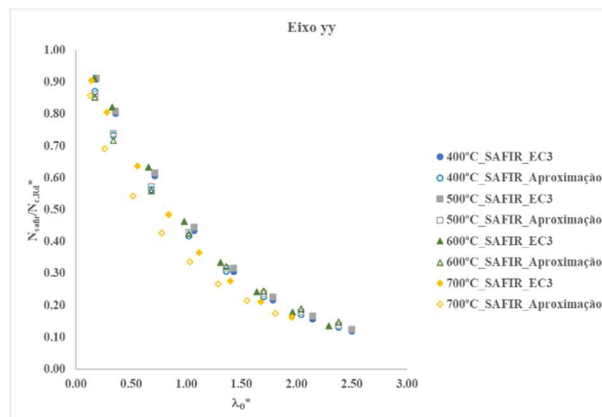


Figura 32 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3 para uma coluna em perfil HEB200 e aço inoxidável 1.4462 no eixo forte

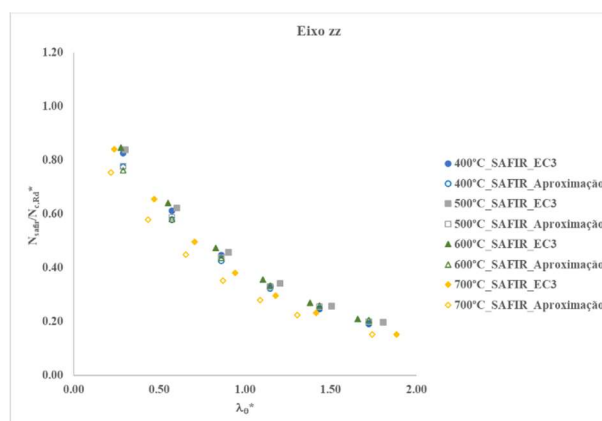


Figura 33 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3 para uma coluna em perfil HEB200 e aço inoxidável 1.4462 no eixo fraco

Para esta classe de aço inoxidável, pela comparação entre os resultados numéricos obtidos para o EC3 e para a sua nova geração, observa-se que para as temperaturas de 400°C, 500°C e 600°C, os resultados obtidos são bastante próximos e, para 700°C, há um claro afastamento.

Na Figura 34 e Figura 35, são apresentados os resultados obtidos para o eixo forte e fraco, respectivamente.

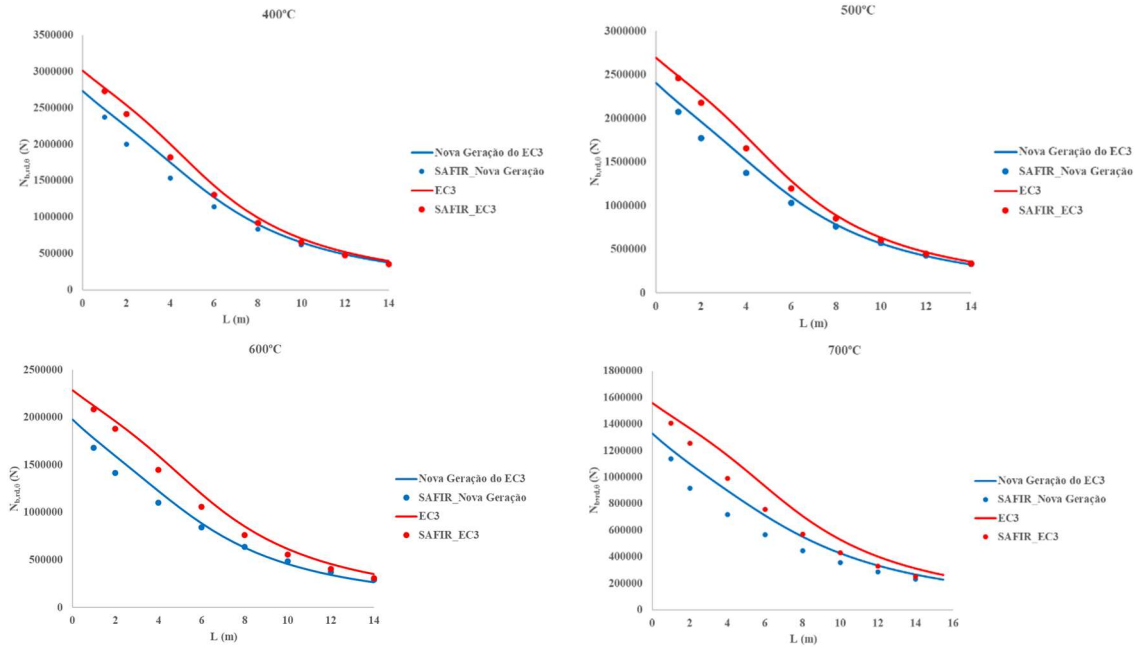


Figura 34 Resultados para o eixo yy em aço inoxidável de classe 1.4462

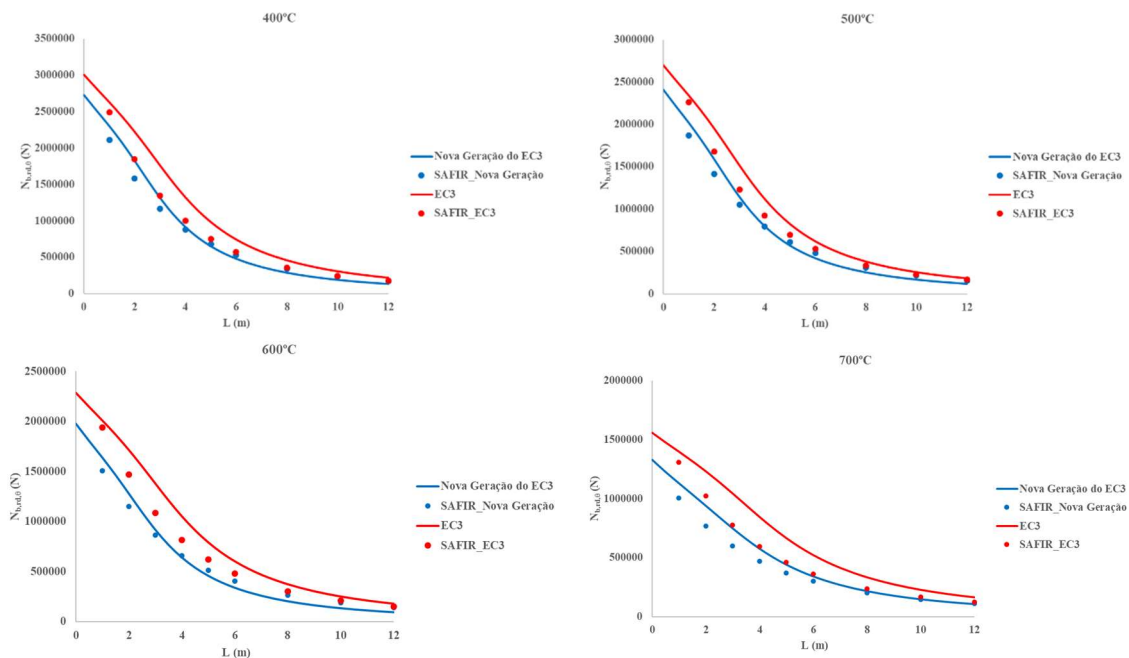


Figura 35 Resultados para o eixo zz em aço inoxidável de classe 1.4462

É de destacar que, para as temperaturas mais elevadas e comprimentos inferiores a 6 metros, as diferenças entre o Eurocódigo 3 e a sua nova geração são mais notáveis. As curvas tendem a ficar mais próximas com o aumento do comprimento da coluna devido ao efeito de encurvadura lateral.

Sempre que os resultados obtidos através do programa de elementos finito SAFIR são superiores à curva de cálculo, ocorre uma situação de insegurança. Para o eixo fraco, este tipo de situação ocorre com frequência para comprimentos de coluna acima dos 4 metros.

4.3.2.3 Aço inoxidável de classe 1.4003

Os resultados numéricos obtidos para uma coluna HEB 200 de aço inoxidável de classe 1.4003, com vários comprimentos, encontram-se na Figura 36 e na Figura 37.

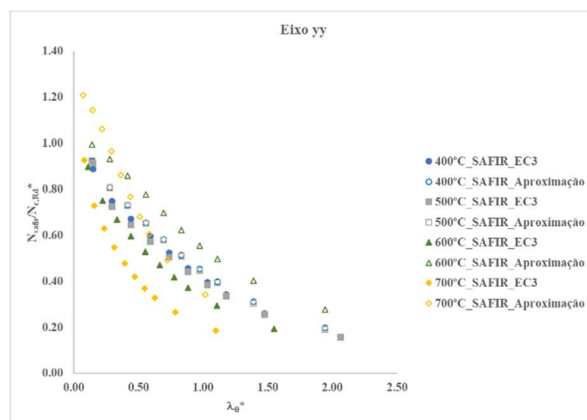


Figura 36 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3 para uma coluna em perfil HEB200 e aço inoxidável 1.4003 no eixo forte

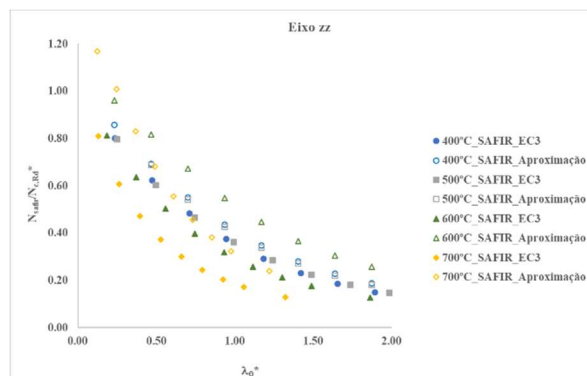


Figura 37 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3 para uma coluna em perfil HEB200 e aço inoxidável 1.4003 no eixo fraco

Os resultados obtidos para esta classe de aço são muito mais dispersos que os obtidos para as análises anteriores. Isto pode ser devido às grandes diferenças entre a lei constitutiva do EC3 e a sua nova geração. Como os resultados obtidos pelo programa SAFIR, neste caso, resultam da aproximação da lei constitutiva para a zona aproximadamente elástica, em especial para as temperaturas de 600°C e 700°C, traduzindo-se numa dispersão dos resultados numéricos.

Os resultados obtidos para o eixo yy são apresentados na Figura 38 e os do eixo zz na Figura 39.

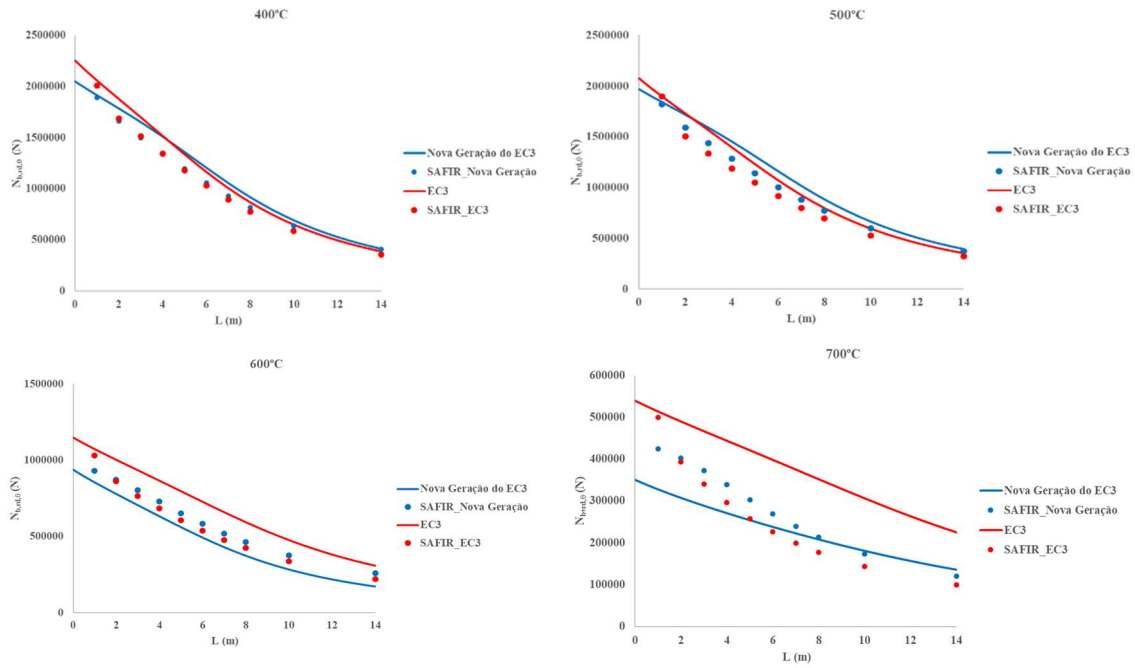


Figura 38 Resultados para o eixo yy em aço inoxidável de classe 1.4003

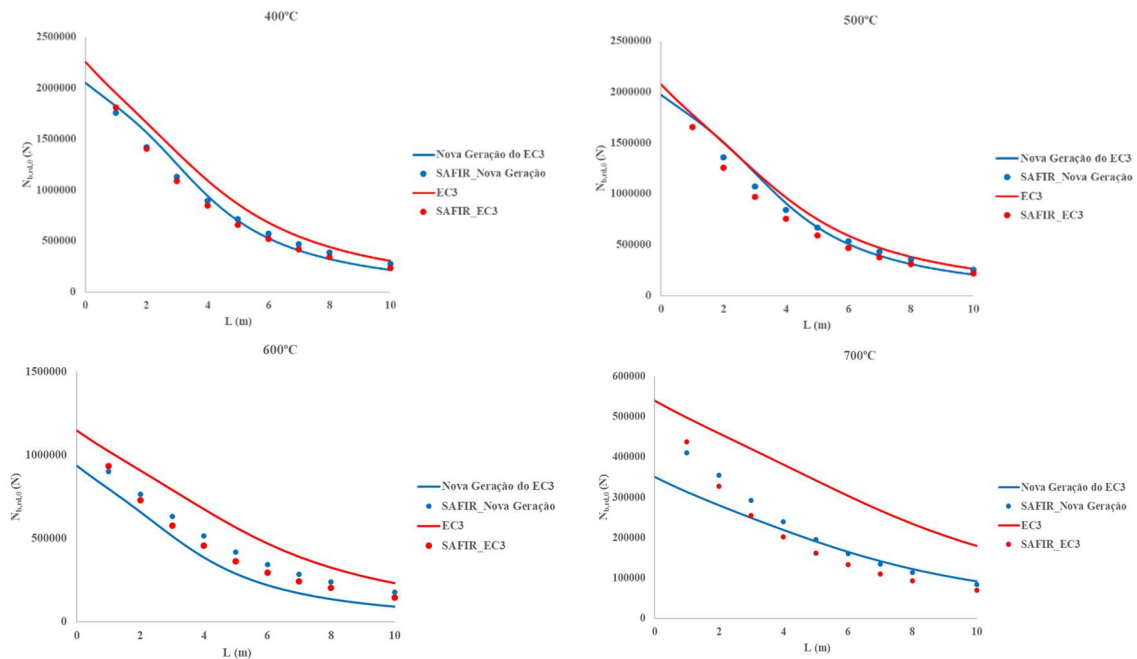


Figura 39 Resultados para o eixo zz em aço inoxidável de classe 1.4003

Para a temperatura de 400°C em ambos os eixos, os resultados obtidos são semelhantes, não se notando, portanto, grandes melhorias nos novos métodos de cálculo. Para a nova geração do EC3, os resultados conseguidos para a temperatura de 500°C pelo programa SAFIR apresentam maior proximidade com a respetiva curva o que implica que para esta temperatura haverá uma otimização no dimensionamento face à versão atual do EC3. Observado os resultados para a temperatura de 600°C é possível estabelecer que no EC3 haveria um sobredimensionamento pois, os valores obtidos pelo SAFIR estão bastante

distantes da curva de cálculo. Já os resultados obtidos para a nova geração pelo programa SAFIR ficam, para ambos os eixos, acima da curva de cálculo. Também para a temperatura de 700°C, os resultados para o EC3 seguem a mesma tendência dos obtidos para a temperatura de 600°C, aqui de forma mais acentuada. Para a nova geração, comprimentos mais pequenos ficam superiores à curva de cálculo e só para comprimento mais elevados se inverte esta tendência, fazendo-se notar em especial neste caso, que para o aço 1.4003, a lei constitutiva sofrerá grandes alterações.

Devido às grandes diferenças entre a lei constitutiva do aço 1.4003 segundo o EC3 e a sua nova geração, foi realizado um estudo para uma adaptação das curvas na zona plástica, como já mencionado no Capítulo 3 deste documento.

Na Figura 40 encontra-se a comparação entre os resultados obtidos para o EC3 e nova geração, para a adaptação realizada na zona plástica, do eixo forte e na Figura 41, do eixo fraco.

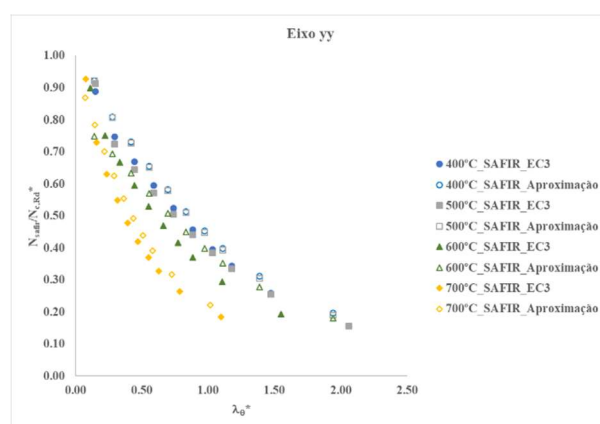


Figura 40 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3, na zona plástica, para uma coluna em perfil HEB200 e aço inoxidável 1.4003 no eixo forte

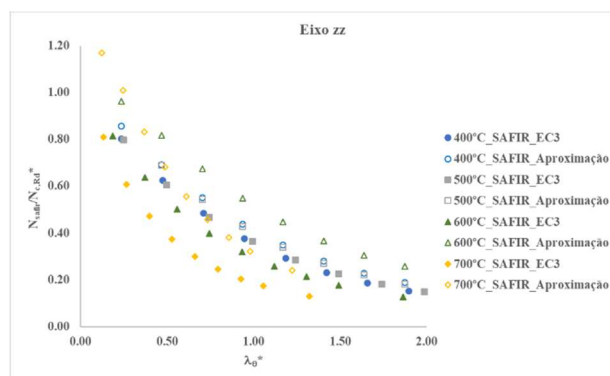


Figura 41 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3, na zona plástica, para uma coluna em perfil HEB200 e aço inoxidável 1.4003 no eixo fraco

Para esta adaptação a dispersão dos resultados não é tão significativa como para a comparação de resultados numéricos obtida para a adaptação feita na zona aproximadamente elástica.

Para a obtenção destes resultados só foi considerada a aproximação da lei constitutiva à zona plástica para as temperaturas de 600°C e 700°C, pois foram as temperaturas onde se notaram as maiores diferenças entre resultados. Assim, nos gráficos acima, os resultados para as temperaturas de 400°C e 500°C são os mesmos que os obtidos anteriormente.

Na Figura 42 encontram-se os resultados obtidos para a adaptação da lei constitutiva na zona plástica, no eixo yy para a temperatura de 600°C e para 700°C. Para o eixo zz, os resultados são apresentados na Figura 43.

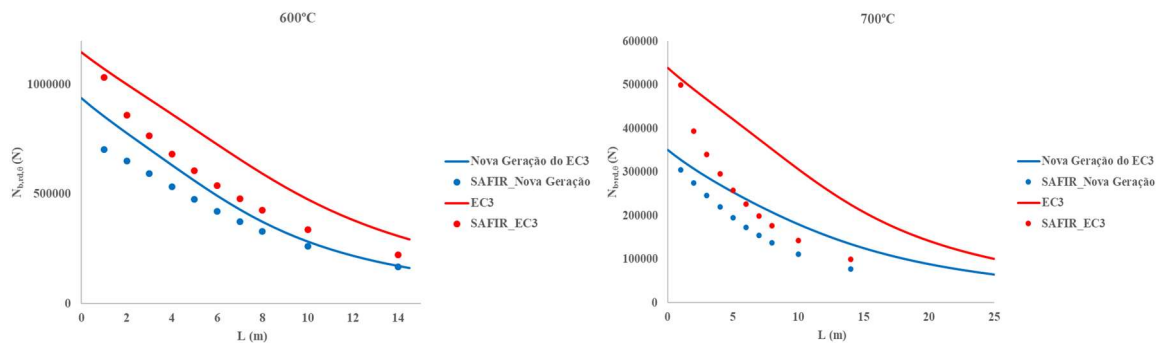


Figura 42 Resultados para o eixo yy em aço inoxidável de classe 1.4003, na adaptação à zona aproximadamente elástica

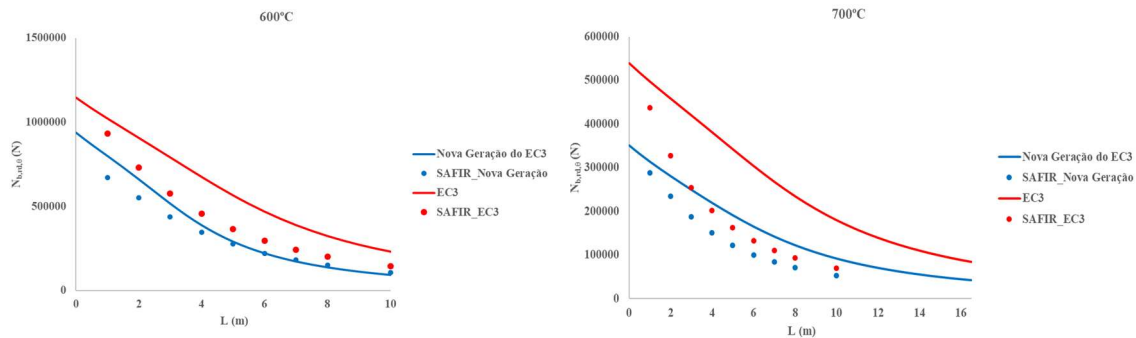


Figura 43 Resultados para o eixo zz em aço inoxidável de classe 1.4003, na adaptação à zona aproximadamente elástica

Tendo em vista os resultados obtidos anteriormente, pode-se concluir que a adaptação da curva da lei constitutiva na zona plástica produz resultados bastante diferentes.

Para a temperatura de 600°C, é possível observar que existe maior proximidade entre os valores obtidos para a nova geração e os obtidos pelo programa SAFIR do que para os obtidos na o EC3. Isto, pode refletir uma alteração introduzida pela nova geração, que

levará a um dimensionamento em situação de incêndio mais próximo dos valores reais de carga.

Algo semelhante pode ser concluído para a temperatura de 700°C, sendo que, para este caso, os valores obtidos pelo programa SAFIR ainda se encontram distantes da curva de cálculo.

4.3.3 Vigas

4.3.3.1 Aço inoxidável de classe 1.4301

A comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC3 e a nova geração do mesmo, para uma viga IPE 220 em aço inoxidável de classe 1.4301, encontra-se na Figura 44.

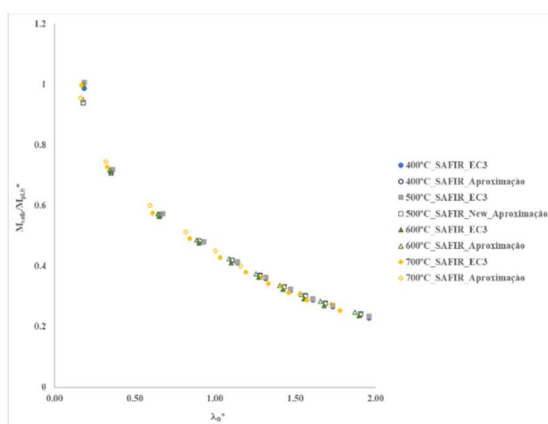


Figura 44 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC3 e a nova geração do EC3 para uma viga com perfil IPE220 e aço inoxidável 1.4301

À semelhança dos que acontecia para colunas em aço inoxidável de classe 1.4301, também para vigas se verifica que os resultados obtidos para o EC3 a sua nova geração são bastante próximos.

Na Figura 45 são apresentadas comparações entre os resultados obtidos através do EC3 a através da sua nova geração

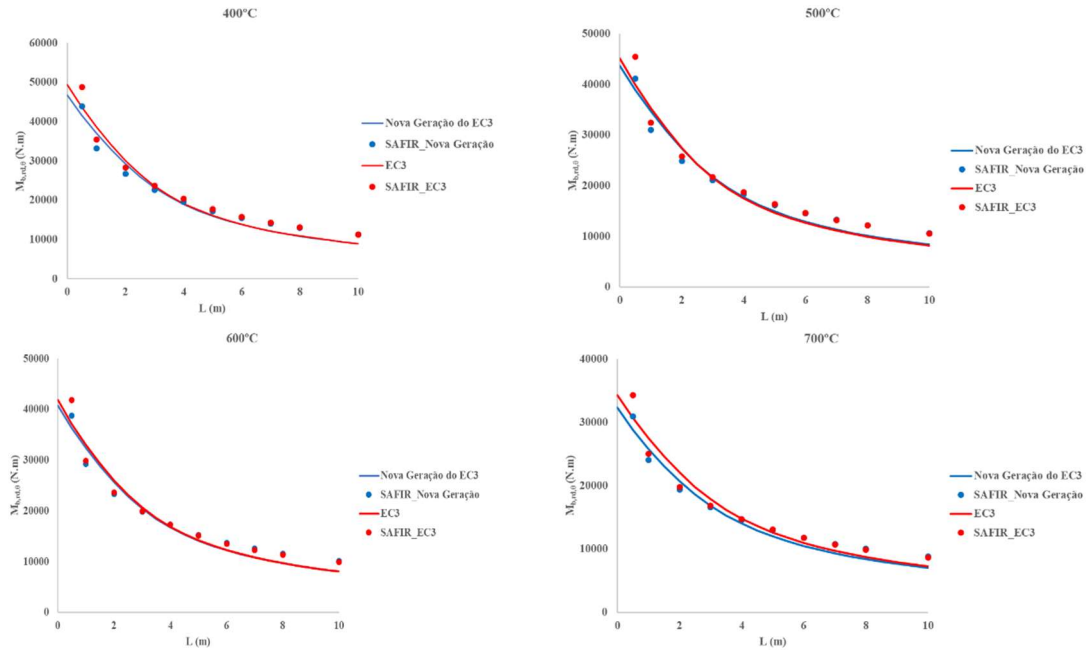


Figura 45 Resultados obtido para uma viga, sujeita a flexão, com perfil IPE220 e aço inoxidável 1.4301

As curvas de comparação são, no geral, próximas sendo que, para comprimentos de viga menores, a curva da nova geração do EC3 está mais próxima dos resultados obtidos com auxílio do programa SAFIR. Para comprimentos de viga maiores que 4 metros verifica-se que os resultados obtidos pelo programa SAFIR são superiores à curva o que indica insegurança

4.3.3.2 Aço inoxidável de classe 1.4462

Na Figura 46 é apresentada a comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC3 e a sua nova geração para uma viga com perfil IPE 220.

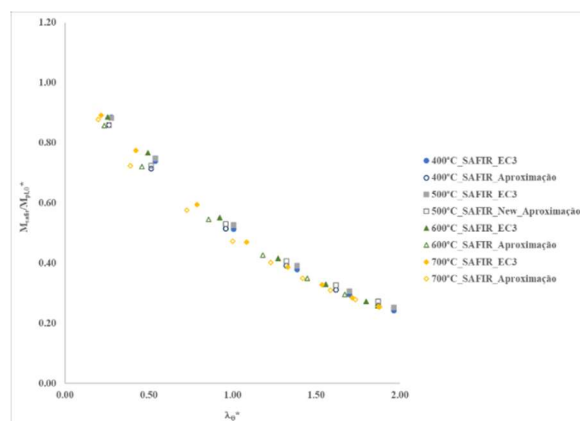


Figura 46 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC 3 e a nova geração do EC3 para uma viga com perfil IPE220 e aço inoxidável 1.4462

Da comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC3 e sua nova geração, observa-se que para as temperaturas mais baixa, 400°C e 500°C, os valores são próximos,

mas, para as temperaturas restante, são mais dispersos, sendo que, à medida que a esbelteza aumenta, os resultados vão se aproximando.

Os resultados obtidos para flexão de um perfil IPE 220 em aço inoxidável de classe 1.4462 para as várias temperaturas estudadas são apresentados na Figura 47.

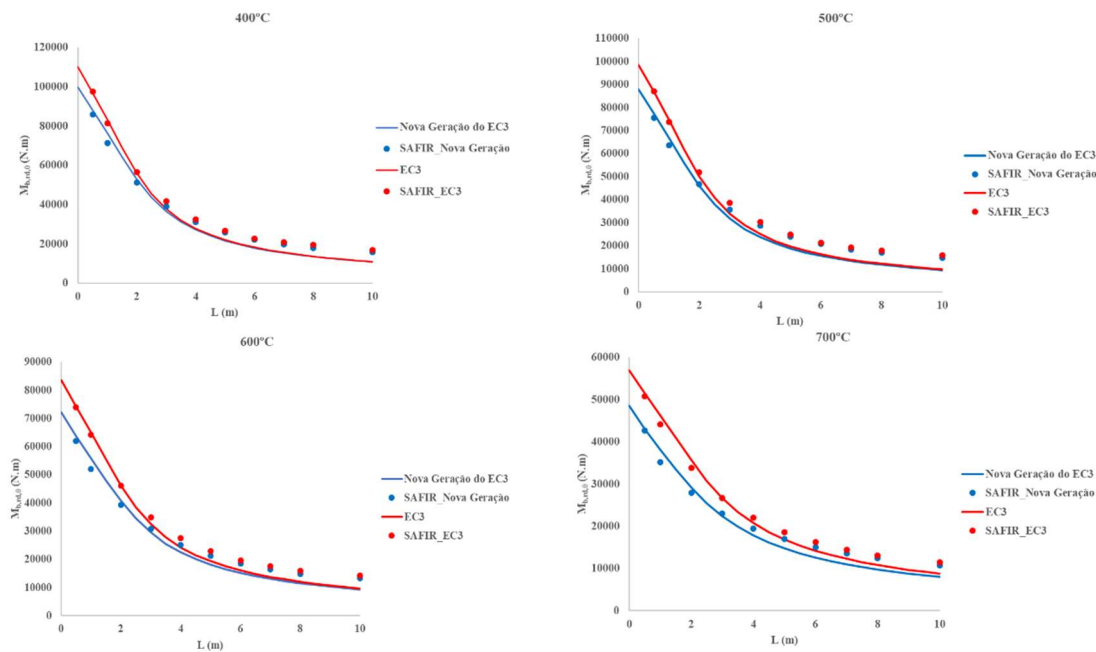


Figura 47 Resultados obtido para uma viga, sujeita a flexão, com perfil IPE220 e aço inoxidável 1.4462

Por observação dos gráficos conclui-se que os valores obtidos através de cálculos e os obtidos através do programa SAFIR são bastante próximos, para ambas as situações, para comprimentos até 4 metros. É ainda de notar, que existem para todas as temperaturas valores experimentais de esforços que não se encontram abaixo das curvas de cálculo, o que quer dizer que não estão do lado da segurança.

4.3.3.3 Aço inoxidável de classe 1.4003

À semelhança do que foi realizado para colunas em aço inoxidável de classe 1.4003, para vigas também foram obtidos valores para uma adaptação da curva de lei constitutiva para a zona aproximadamente elástica e para a zona plástica.

Na Figura 48 encontram-se os resultados obtidos para o EC3 e a sua nova geração para uma viga em perfil IPE 220.

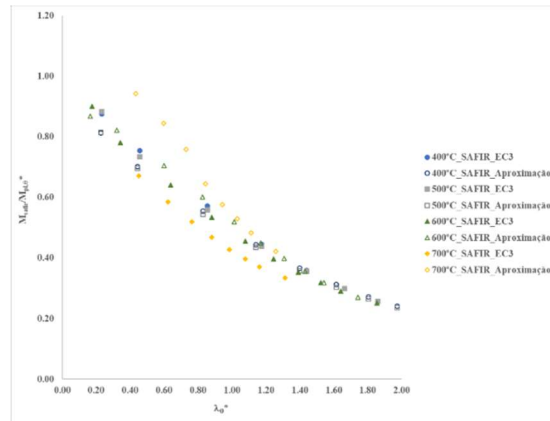


Figura 48 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC3 e a nova geração do EC3 para uma viga com perfil IPE220 e aço inoxidável 1.4003

Estes resultados comparativos entre diferentes temperaturas foram obtidos através da aproximação da curva da lei constitutiva na zona aproximadamente elástica. É de notar que, para a temperatura de 700°C e para esbeltezas menores, os resultados obtidos apresentam-se bastante afastados. Com o aumento da temperatura a diferença entre valores obtidos para EC3 e para a sua nova geração vão progressivamente ficando mais afastados.

Para o esforço de flexão de diferentes temperaturas imposta numa viga em perfil IPE 220, os resultados obtidos por meio do EC3 e a sua nova geração são apresentados na Figura 49.

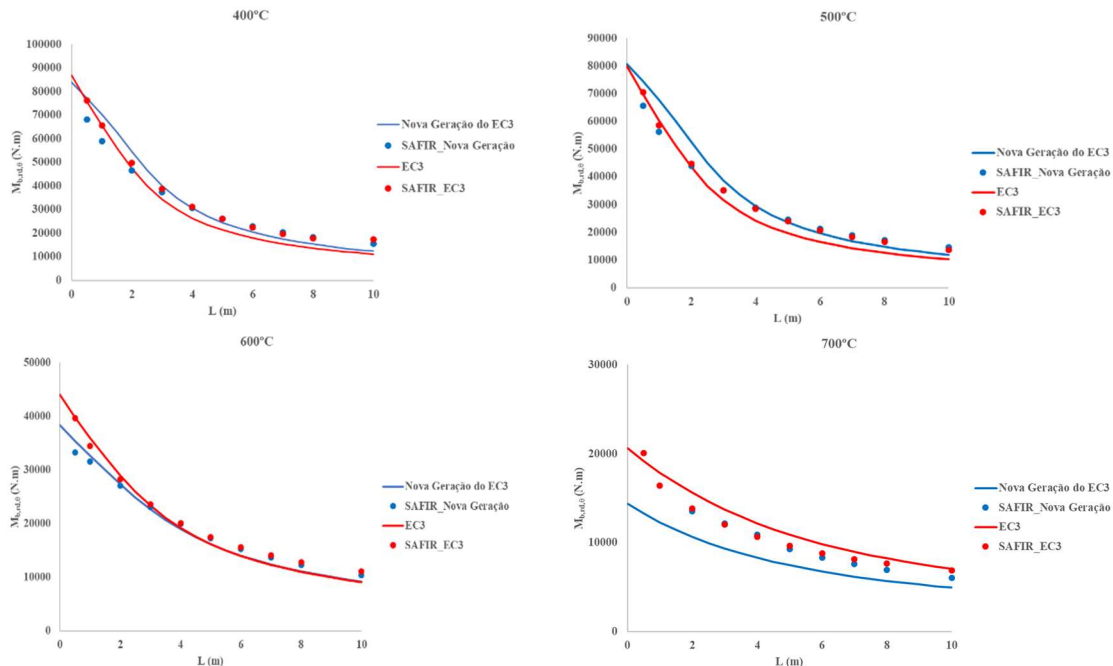


Figura 49 Resultados obtido para uma viga, sujeita a flexão, com perfil IPE220 e aço inoxidável 1.4003

Para a temperatura de 400°C e 500°C, a curva de cálculo da nova geração é superior à curva de cálculo produzida pelo EC3 atual. Pode-se observar que os resultados obtidos através do programa SAFIR para a nova geração e comprimentos de viga menores são inferiores aos

obtidos para o EC3. Assim, as diferenças entre valores de cálculo e valores de esforço em situação de incêndio são ainda mais agravadas.

A 600°C, em ambos os casos os resultados de cálculo e do programa SAFIR têm comportamentos semelhantes sendo que, para comprimentos inferiores a 4 metros, os resultados da nova geração ficam abaixo dos resultados obtidos para o EC3.

À semelhança do comportamento que foi obtido para a temperatura de 700°C para colunas em aço de classe 1.4003, é nesta situação que a curva de cálculo do EC3 e da nova geração têm as maiores diferenças. Note-se que a curva obtida para a nova geração é bastante inferior à do EC3 o que, mais uma vez, indica que para esta classe de aço ocorreram grandes mudanças na sua lei constitutiva. Contudo, os resultados obtidos pelo programa SAFIR são bastante próximos para esta situação.

Devido as diferenças nos resultados obtido, em especial para as temperaturas de 600°C e 700°C, foram feitos estudos para a lei constitutiva adaptada à zona plástica. A Figura 50 mostra os valores numéricos obtido para a comparação, na zona plástica, do EC3 e da sua nova geração para uma viga sujeita a esforço de flexão em perfil IPE220.

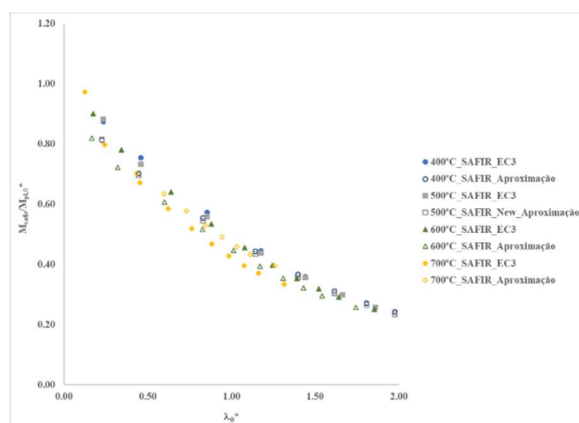


Figura 50 Comparação entre resultados numéricos obtidos para o EC3 e a nova geração do EC3, na zona plástica, para uma viga com perfil IPE200 e aço inoxidável 1.4003

Os resultados obtidos para a aproximação feita na zona plástica encontram-se na Figura 51.

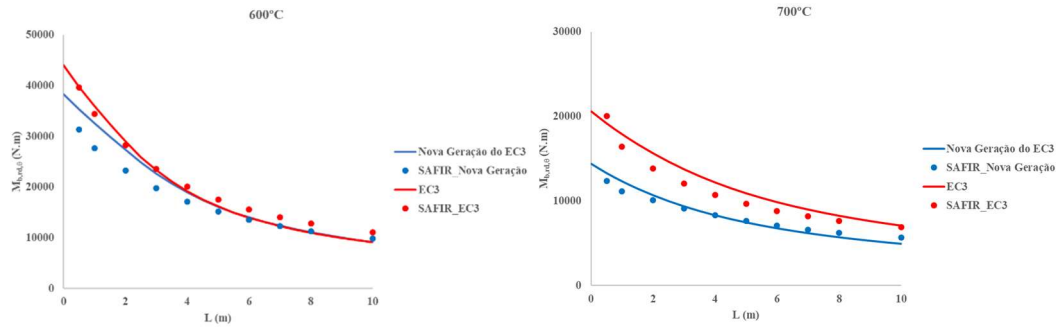


Figura 51 Resultados para uma viga em perfil IPE220, em aço inoxidável de classe 1.4003, na adaptação à zona aproximadamente elástica

Para a adaptação da lei constitutiva na zona plástica ocorre uma drástica diferença de resultados em comparação com a adaptação feita para a zona aproximadamente elástica. Da observação dos gráficos, conclui-se que para a temperatura de 600°C, as curvas resultantes dos valores de cálculo assumem comportamentos iguais para comprimentos maiores que 2 metros. Os valores obtidos pelo programa SAFIR, para o EC3, são muito próximos da curva de cálculo e passam acima desta para comprimentos acima de 2 metros. Já para os resultados obtidos pelo SAFIR para a nova geração ficam abaixo da curva nos comprimentos de vida abaixo dos 6 metros.

A 700°C, os resultados de cálculo e os obtidos pelo programa SAFIR mostram-se de forma mais coerente entre si para esta adaptação. Tanto a curva de cálculo da nova geração como os valores obtidos pelo programa SAFIR, encontram-se abaixo dos resultados obtidos para o EC3 atual, mais uma vez, evidenciando as alterações que a proposta de revisão imporá.

4.4 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas as regras de cálculo que permitem obter a resistência da secção transversal e do elemento. Foram ainda, apresentados os resultados conseguidos por análise numérica para colunas e vigas de diferentes perfis e classes de aço inoxidável.

A análise feita consistiu na avaliação de resistência ao fogo às temperaturas de 400°C, 500°C, 600°C e 700°C, sendo que foram realizadas análises para diferentes comprimentos dos elementos de modo a que se pudesse verificar os efeitos que o fenómeno de encurvadura lateral pode causar.

Sendo o principal objetivo verificar se a nova geração do Eurocódigo 3 imporá alterações importantes no dimensionamento de elementos em aço inoxidável, conclui-se que apresenta melhorias significativas em alguns casos, mas nos restantes, não traz mais-valia ao existente e em diversas situações não corrige as falhas que já eram antes apontadas ao EC3.

Capítulo 5

Exemplo de cálculo de uma aplicação estrutural em aço inoxidável

Exemplo de cálculo de uma aplicação estrutural em aço inoxidável

- 5.1 Considerações gerais
- 5.2 Degraus
- 5.3 Coluna
- 5.4 Considerações finais

5. EXEMPLO DE CÁLCULO DE UMA APLICAÇÃO ESTRUTURAL EM AÇO INOXIDÁVEL

5.1 Considerações gerais

A aplicação de aço inoxidável em elementos estruturais pode ser vantajosa face a outros materiais, devido às qualidades desejáveis que apresenta, mesmo que o seu custo inicial seja mais elevado.

Com o objetivo de compreender melhor o comportamento do aço inoxidável, fazendo em simultâneo a ligação entre as fórmulas do Eurocódigo 3 e a modelação numérica de estruturas, considerou-se uma estrutura estudada neste exemplo surgiu no decorrer do estágio curricular, cujo relatório se encontra em anexo neste documento, pertencente à obra Clairsienne. A estrutura, uma escada metálica helicoidal, tinha como material de construção aço carbono S275 e, neste capítulo serão realizadas verificação de segurança admitindo que a estrutura seria realizada em aço inoxidável de classe 1.4301.

Esta estrutura possibilitou o estudo de secções de classe 4, que não foram anteriormente abordadas, através de modelos numéricos de elementos finitos do tipo casca, considerando assim, a existência de encurvadura local.

Será ainda apresentada a análise da temperatura crítica da estrutura em situação de incêndio.

O objetivo deste exercício foi verificar a segurança da escada se esta fosse realizada em aço inoxidável e ainda verificar o seu desempenho em situação de incêndio sendo que, foram considerados que os perfis não serão protegidos.

Na Tabela 27 encontram-se as propriedades do material usadas nos cálculos, bem como os coeficientes de segurança.

Tabela 27 Propriedades do material

Aço inoxidável 1.4301	
f_y	210MPa
f_u	520MPa
E	200000MPa

Nos cálculos que serão apresentados, não foi tido em conta a sobrecarga aplicada ao guarda-corpos. As verificações de segurança foram apenas efetuadas para os degraus e para o pilar que suporta toda a estrutura. As combinações de ações consideradas para Estado Limite Último são apresentadas na Tabela 28.

Tabela 28 Combinações de ações consideradas para efeito de verificação de segurança

Caso	Nome do caso	Natureza	Tipo de análise
200	1.35Gk+1.5Qk	Permanente	Combinação linear
201	1.35Gk+1.5Qk_pontual	Permanente	Combinação linear
300	1.0Gk+1.0Qk	Permanente	Combinação linear
301	1.0Gk+1.0Qk_pontual	Permanente	Combinação linear

Para proceder à verificação de segurança dos degraus, considerou-se que estes tinham o mesmo comportamento de uma viga em consola, com 1.40 m de desenvolvimento, como representado na Figura 52. Os degraus teriam secção variável ao longo do seu desenvolvimento, a parte superior, começando com cerca de 0.05 m no apoio e acabando com 0.5 m, com um reforço soldado também de secção variável, começando no apoio com 0.14 m e acabando com 0.08 m.

Na Figura 52 encontram-se ainda assinaladas as secções na Figura 53. Os degraus compõem-se por um perfil construído a partir de chapa de 10 mm de espessura.

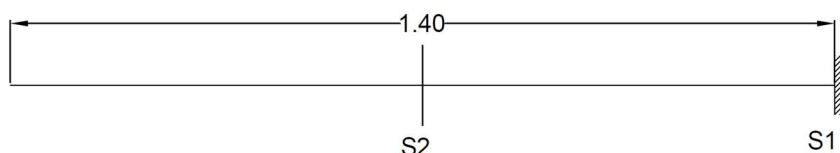


Figura 52 Alçado do degrau

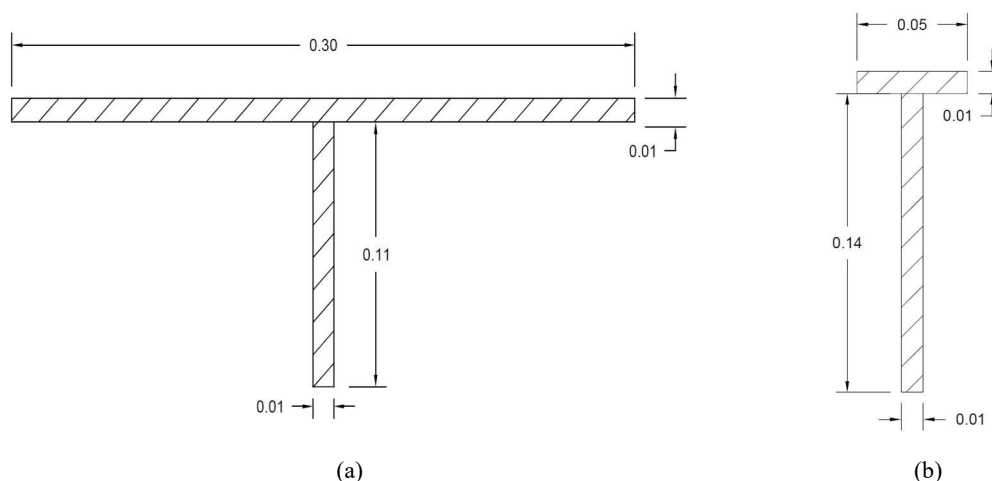


Figura 53 Seções transversais consideradas: (a) secção a meio comprimento (S2); (b) secção no apoio (S1)

A coluna é composta por um perfil de secção oca CHS 219.1 x 6, com 6.5 m de desenvolvimento. Suporta as cargas de 37 degraus e tem apoios em ambas as extremidades.

5.2 Vigas de degraus de escada

De seguida, serão apresentadas as verificações de segurança efetuadas para os degraus da escada helicoidal.

5.2.1 Verificações de segurança para ELU para os degraus

Para proceder às verificações necessárias, as ações consideradas foram as apresentadas na Tabela 29.

Tabela 29 Cargas consideradas para verificações de segurança dos degraus

Cargas aplicadas aos degraus	Valor
Ação permanente: peso próprio	0.68 kN
Ação permanente: revestimento	0.10 kN/m
Ação variável: sobrecarga	0.60 kN/m
Ação variável: carga pontual	2.00 kN

Para proceder à avaliação da segurança, é primeiro necessário determinar a classe da secção transversal. Segundo a Parte 1-4 do Eurocódigo 3, a secção a meio vão, S1, é de classe 4, pelo que teria de se proceder ao cálculo da secção efetiva transversal para obter o módulo de flexão elástico efetivo. Para a secção do apoio, a classe obtida foi 1, pelo que se usaria o módulo de flexão plástico nos cálculos.

As ações atuantes consideradas provocam esforços transversos e momentos fletores nos degraus e assim, seguindo das disposições do EC3 para ELU, os resultados obtidos são os apresentados na Tabela 30, para a secção do apoio.

Tabela 30 Resultados obtidos para a secção do apoio dos degraus em ELU

V_{Ed}	M_{Ed}
3.80 kN	5.32 kN.m

Devido aos esforços aos quais a secção transversal foi submetida, foi necessário efetuar as devidas verificações quanto ao fenómeno de encurvadura lateral. Como a secção transversal é monossimétrica, com inércia variável e o degrau encontra-se em consola, as fórmulas de cálculo analíticas encontradas na literatura não se adequavam à situação. Assim sendo, optou-se por realizar uma análise numérica de elementos finitos para encontrar o momento crítico do elemento, pois pelo método geral do EC3 seria necessário calcular os esforços atuantes e a resistência dividindo o elemento em n secções até chegar à secção crítica.

Para a análise numérica, utilizaram-se as seguintes metodologias de cálculo:

1. Cálculo do λ com recurso aos resultados numéricos de resistência da secção e momento crítico e aplicação do fator de redução à encurvadura lateral do EC3 Parte 1-4, com a resistência da secção numérica;
2. Resistência última obtida numericamente.

O programa utilizado para a construção do modelo foi o programa GiD, tendo-se utilizado o SAFIR como meio para obter o momento crítico, o momento característico resistente da secção transversal crítica e o momento resistente da viga.

Na Figura 54 encontra-se o resultado obtido através do SAFIR da carga para a qual o momento resistente da secção transversal, $M_{b,Rd}$, é atingido, que pela análise do programa, é igual a 19.50 kN.m. Este valor foi obtido considerando a tensão última de cedência do aço inoxidável iguala 210 MPa.

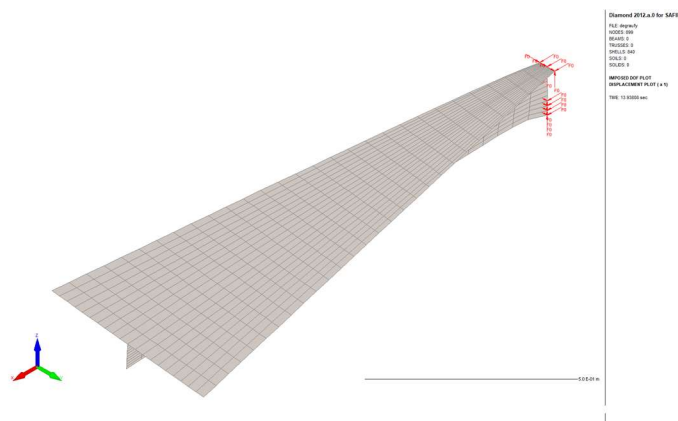


Figura 54 Deformada obtida para o cálculo do momento resistente da viga

O momento característico da secção transversal, M_{Rk} , obtido através da análise numérica, foi de 26.04 kN.m. Foi conseguido restringindo a encurvadura lateral da secção e considerando a tensão de cedência igual a 210 MPa. Na Figura 55 apresenta-se o modelo utilizado para determinação do momento resistente característico da secção.

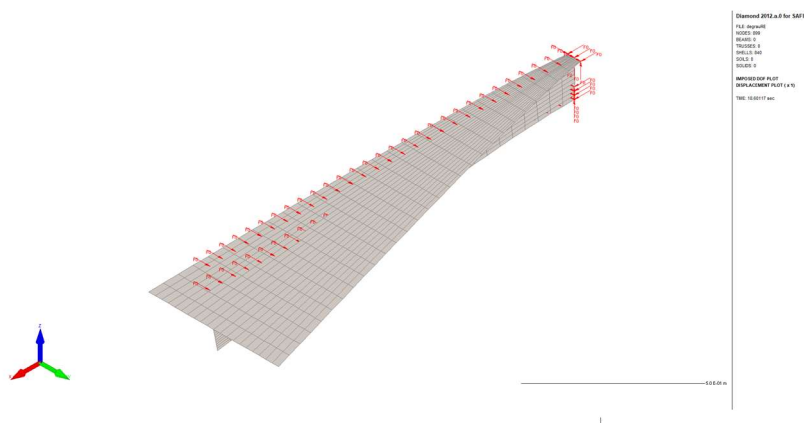


Figura 55 Deformada obtida para o cálculo do momento característico da secção transversal obtido numericamente

Para obter a carga crítica do elemento, considerou-se que a tensão de cedência seria infinita de forma a que se atingisse o colapso num modelo com lei constitutiva perfeitamente elástica linear. Na Figura 56 encontra-se representado o resultado obtido para a carga crítica, sendo o momento crítico, M_{cr} , que esta origina igual a 84.70 kN.m.

Com estes resultados, procedeu-se ao cálculo da esbelteza numérica da secção. Aplicando a fórmula de calculo da esbelteza do EC3 $\sqrt{\frac{M_{Rk}}{M_{Cr}}}$, obtendo-se o valor de 0.55 e, sendo este resultado superior a 0.40, pelo EC3 será necessário verificar a encurvadura lateral da secção.

Para verificar a resistência à encurvadura lateral da secção, utilizou-se o momento característico da secção obtido numericamente.

Estes valores são aproximados, concluindo que o cálculo do fator de redução à encurvadura lateral do EC3 é aplicável. Adicionalmente, ambos são superiores ao momento atuante, como se apresenta na Tabela 31.

	M_{Rd}
Cálculo 1	22.45 kN.m
Cálculo 2	19.45 kN.m

5.2.2 Cálculo da resistência em situação de incêndio para os degraus

Para as verificações de segurança que serão abaixo efetuadas, a escada encontra-se, segundo o projeto, localizada no exterior, servindo de acesso dos pisos mais elevados a uma cobertura ajardinada do edifício, e considerou-se que em situação de incêndio poderia atuar como possível via de evacuação.

A situação de incêndio é considerada uma ação accidental, pelo que é necessário proceder a novas combinações de ações, como se indica na Tabela 32.

Tabela 32 Combinações de ações em situação de incêndio

Caso	Nome do caso	Natureza	Tipo de análise
400	1.0Gk+0.5Qk	Permanente	Combinação linear
401	1.0Gk+0.5Qk pontual	Permanente	Combinação linear

Obteve-se que a secção a meio comprimento, em situação de incêndio, também seria de classe 4 e a secção do apoio de classe 1.

Das combinações de ações apresentadas anteriormente, resultam os esforços da Tabela 33, para a secção do apoio.

Tabela 33 Resultados obtidos para a secção do apoio dos degraus em situação de incêndio

Combinação	V _{Ed,fi}	M _{Ed,fi}
400	0.99 kN	1.39 kN.m
401	1.59 kN	2.23 kN.m

Para avaliação da temperatura crítica da secção, foi realizada por dois processos diferentes.

O primeiro processo consistiu em utilizar o momento característico da secção, obtido com o SAFIR anteriormente, para descobrir a temperatura crítica, tendo-se obtidos uma temperatura igual a 1025.29°C.

Tabela 34 Temperatura crítica dos degraus

$k_{0.2p,\theta}$	$\sqrt{\frac{k_{0.2p,\theta}}{k_{E,\theta}}}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta}$	$\phi_{LT,fi}$	$\chi_{LT,fi}$	$M_{b,fi,0,Rd}$	$\mu_0=k_{0.2p,q}$	θ_{crit}	$k_{E,q}$
1.00	1.00	0.55	0.84	0.68	17.58	0.063	995.84	0.21
0.06	0.55	0.30	0.65	0.82	21.24	0.052	1025.23	0.17
0.05	0.55	0.30	0.65	0.82	21.24	0.052	1025.29	0.17
0.05	0.55	0.30	0.65	0.82	21.24	0.052	1025.29	0.17

Tendo em consideração o reduzido valor das ações, as temperaturas críticas apresentam valores elevadas e próximas entre si.

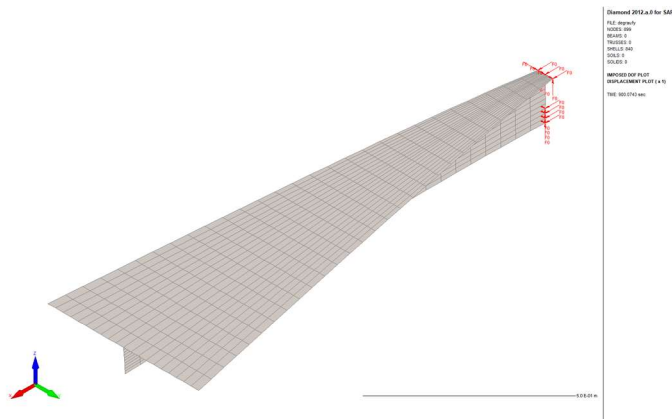


Tabela 36 Dados da coluna em perfil CHS 219,1 x 6mm

Perfil CHS 219,1 x 6mm	
Classe da seção transversal	1
Área da seção transversal	39.50 cm ²
I	2247 cm ⁴
i	7.54 cm
W _{pl}	260 cm ³

Sendo que as combinações de ações são as mesmas que as realizadas para os degraus, os resultados obtidos são expostos na Tabela 37.

Tabela 37 Resultados obtidos para a coluna em ELU

N _{Ed}	N _{Rd}	Verificação
143.22 kN	754.09 kN	OK

Outra verificação a fazer para ELU é a estabilidade do elemento, implicando assim a verificação da encurvadura.

Tendo-se obtido um coeficiente de redução de encurvadura igual a 0.66, de acordo com o EC3 Parte 1-4, a coluna estará sujeita a fenômenos de encurvadura prejudiciais à estabilidade do pilar. Procedendo ao cálculo da resistência à encurvadura, obteve que esta seria igual a 501.21 kN e assim, a razão entre o esforço atuante e o esforço resistente seria menor que 1, não existindo problemas quanto à encurvadura.

5.3.2 Verificação de segurança em situação de incêndio para a coluna

As combinações de ações para verificação do pilar em situação de incêndio são iguais às consideradas para os degraus nas mesmas circunstâncias. Para essas combinações, os resultados de esforços obtidos encontram-se na Tabela 38.

Tabela 38 Resultados obtidos para a coluna em situação de incêndio

Combinação	N _{Ed,fi}
400	38.87 kN
401	60.87 kN

De forma a determinar a resistência do pilar sob condição de incêndio, foi necessário determinar o grau de utilização (μ_0) para assim, por interpolação, se estimar a temperatura crítica do perfil, mantendo como condição que $\mu_0 = k_{y,\theta}$.

Considerando que o grau de utilização será igual ao $k_{y,\theta}$, obteve-se a temperatura crítica do perfil de 990.38°C. Essa temperatura foi conseguida por processo iterativo até se atingir a convergência de valores, como se apresenta na Tabela 39.

Tabela 39 Processo iterativo para obtenção da temperatura crítica da coluna

Temperatura(°C)	$\sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}}$	$\bar{\lambda}_0$	ϕ_θ	χ_{fi}	$N_{b,fi,o,Rd}$ (kN)	μ_0	$\theta_{a,crit}$ (°C)
20	1.17	1.04	1.40	0.43	489.91	0.124	984.58
984.58	0.72	0.64	0.93	0.63	520.21	0.117	990.48
990.48	0.72	0.64	0.93	0.63	519.66	0.117	990.38
990.38	0.72	0.64	0.93	0.63	519.67	0.117	990.38

5.4 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentado um exemplo de cálculo de uma aplicação estrutural em aço inoxidável.

A estrutura considerada, uma escada helicoidal, foi obtida de um dos trabalhos realizado durante o estágio curricular e serviu de base para desenvolver todos os cálculos que foram apresentados. A secção correspondente ao degrau, um perfil construído com chapa de 10 mm de espessura, era monossimétrica, com secção e inércia variáveis, o que fez com que se adotassem metodologias de cálculo numéricas, e a coluna de suporte consistia num perfil comercial CHS 219.1 x 6.

As verificações de segurança levadas a cabo tiveram como base as recomendações do Eucocódigo 3 e do programa de elementos finitos SAFIR, antes utilizado para a análise numérica das leis constitutivas.

Capítulo 6

Considerações finais

Considerações finais

6.1 Conclusões

6.2 Desenvolvimentos futuros

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

A presente dissertação apresenta um estudo realizado no âmbito das aplicações e resistência ao fogo de elementos estruturais em aço inoxidável, consistindo em realizar diversos testes de comparação entre as metodologias de cálculo previstas no Eurocódigo 3.

Começou-se por abordar as características do aço inoxidável de forma a salientar as vantagens que advêm da sua utilização bem como desvantagens.

De seguida, apresentaram-se exemplos de aplicação, na construção civil, de diversos elementos em aço inoxidável, explicando o contexto em que estes foram empregues.

Como o estudo levado a cabo tratava deste material a temperaturas elevadas, foram apresentadas as suas respetivas propriedades mecânicas segundo o Eurocódigo 3 e segundo a sua proposta de revisão.

A realização do estudo foi levada a cabo com auxílio do programa SAFIR, e para isso, foi necessário proceder a adaptações à lei constitutiva das classes de aço inoxidável analisadas, pois o programa de análise não se encontrava preparado para trabalhar com uma lei diferente da do atual EC3. Para estas adaptações fez-se recurso do programa de cálculo numérico MATLAB de forma a que fossem obtidas adaptações o mais fiáveis possível.

Foi apresentado um enquadramento das regras de cálculo em situação de incêndio em vigência e das que se pretende implementar, de forma a identificar as diferenças entre ambas.

Após apresentadas as regras de cálculo simples, procedeu-se à análise numérica. Foram analisadas colunas e vigas em diferentes classes de aço, apresentando os resultados obtidos através de gráficos comparativos.

Para as colunas foram apresentados os resultados numéricos de resistência ao esforço axial, em situação de incêndio, obtidos através da aplicação da metodologia do EC3 e da aproximação da lei constitutiva proposta na revisão ao mesmo. Verificou-se que a nova geração do EC3 será, no geral, menos conservativa face ao existente, sendo que, para o aço ferrítico, os resultados para temperaturas superiores mostraram grande discrepância entre a curva de cálculo e a análise retirada do programa SAFIR. Procedeu-se então a uma nova adaptação da lei constitutiva na zona plástica de forma a se tentar uma melhor aproximação

entre os resultados. Houve uma aproximação entre as curvas de resultados, mas as discrepâncias mantiveram-se.

Nas vigas, teve-se em consideração o efeito da encurvadura e da resistência à flexão dos perfis ensaiados. Os resultados obtidos para o EC3 e a sua proposta de revisão foram próximos, sendo que, mais uma vez, para o aço ferrítico nas temperaturas mais elevadas foi onde se observaram as maiores diferenças. Mais uma vez, tentou-se melhorar os resultados através de uma nova adaptação da lei constitutiva na zona plástica, neste caso, obtendo-se resultados mais coerentes entre si.

Acabou por se concluir que a revisão introduzirá melhorias no dimensionamento de elementos a temperaturas elevadas na maioria dos casos, mas noutros não parece trazer mais-valias claras e até parece não conseguir corrigir falhas já atribuídas ao atual Eurocódigo 3.

Finalmente, foi ainda apresentado um exemplo de cálculo de uma aplicação estrutural em aço inoxidável, adaptando um dos trabalhos realizados durante o período de estágio curricular. Foram efetuadas as verificações necessárias para verificação dos Estados Limites Últimos da estrutura, tendo que se obter resultados através de análises numéricas devido à natureza das secções. Foram também estudadas as temperaturas críticas que seriam atingidas pela estrutura numa situação de incêndio, tendo-se recorrido ao programa SAFIR, no caso dos degraus, para obter cargas críticas da secção, para assim se calcular a esbelteza a temperaturas elevadas.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Com o término deste estudo, percebe-se que assuntos relevantes ficaram por abordar e analisar.

No estudo comparativo entre leis constitutivas a altas temperaturas, foram analisados perfis de secção transversal até à classe 3. A isto, podem-se seguir outros estudos para secção de classe 4. Os perfis estudados foram IPE e HE e, por isso, sugere-se que sejam realizados outros estudos para, por exemplo, perfil tubulares.

Os elementos estudados foram apenas sujeitos a esforço axial e a flexão simples, e futuros estudos poderiam contemplar a flexão composta.

Para a análise numérica realizada nesta dissertação, foi utilizado o programa SAFIR, que apenas está preparado para a lei constitutiva atualmente presente no Eurocódigo 3, tendo

sido necessário recorrer a adaptações à lei constituída em proposta de revisão para se obter resultados. Por isto, seria importante fazer estudos com um programa em que a nova lei constitutiva fosse implementada de forma a se obter resultados mais fiáveis. Seria ainda relevante que ensaios experimentais fossem levados a cabo, de forma se obter uma possível validação para os resultados obtidos.

Por fim, do exemplo de cálculo apresentado nesta dissertação, surgiu a necessidade de estudos para secções de geometria e inércia variável e para o desenvolvimento de formulações analíticas de elementos em consola de secção monossimétrica e de inércia variável.

Referências bibliográfica

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Architech SA. (2016). Ecole de Médecine | architech sa. Retrieved June 18, 2019, from <https://www.architech.ch/projets/ecole-medecine-geneve/>
- Arestalfer. (2015). *Soluções em Construção Metálica*.
- Arestalfer | Empresa. (2019). Retrieved May 13, 2019, from <https://www.arestalfer.com/pt/empresa>
- Autodesk. (2008). *Autodesk Robot Structural Analysis Metric Getting Started Guide*. Retrieved from http://download.autodesk.com/us/support/files/robot_getting_started_guide_eng_2011_metric_2.pdf
- Autodesk. (2019). Robot Structural Analysis 2019 Help. Retrieved June 26, 2019, from <https://help.autodesk.com/view/RSAPRO/2019/ENU/>
- Azevedo, J. (2017). *Comportamento ao fogo de secções transversais de vigas e pilares em aço inoxidável*. Universidade de Aveiro.
- Bureau de Vente. (2018). Le Belvédère - Bordonova : programme immobilier neuf à Bordeaux. Retrieved April 1, 2019, from <https://www.cogedim.com/>
- CEN. (2005a). *EN 1993-1-1, Eurocode 3, Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*.
- CEN. (2005b). *EN 1993-1-2, Eurocodigo 3: Parte 1-2: Verificação da resistência ao fogo*.
- CEN. (2006a). *EN 1993-1-4, Eurocode 3 : Design of steel structures – Part 1-4: General rules – Supplementary Rules for Stainless steels*.
- CEN. (2006b). *EN 1993-1-5, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements*.
- CEN. (2009). *EN 1990, Eurocódigo 0 - Bases para o projeto de estruturas, 1999*, 88.
- CEN. (2010a). *EN 1993-1-8 - Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints*.
- CEN. (2010b). *EN 1997, Eurocódigo 7: Projecto geotécnico*.
- CEN. (2018). *EN 1993-1-2, Eurocodigo 3: Parte 1-2: Verificação da resistência ao fogo*.
- Clairsienne le mag. (2017). Bordeaux Euratlantique : l'îlot de Clairsienne s'appellera LUMI | Clairsienne - Le Mag'. Retrieved June 11, 2019, from <http://www.clairsienne-lemag.fr/presse/bordeaux-euratlantique-lilote-clairsienne-sappellera-lumi/>
- Courbevoie, P. de. (2018). L'Îlot Paul Bert | Projets de Courbevoie. Retrieved April 8,

- 2019, from <https://www.projetsdecourbevoie.fr/1709/l-ilot-paul-bert.htm>
- Courbis, C. (2016). *LA RÉNOVATION DU MUSÉE CARNAVALET HISTOIRE DE PARIS*. Retrieved from www.carnavalet.paris.fr
- Euro Inox. (2002). *The self-repair mechanism of stainless steel*. Euro Inox.
- Faria, J. (2014). *Sebenta de Gestão de Obras e Segurança*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Forten. (2018). BELVEDERE TOURS TREGEY – BORDEAUX – (33). Retrieved April 1, 2019, from <https://www.forten.fr/references/belvedere-tours-tregey-bordeaux-33/>
- Franssen, J. M., & Gernay, & T. (2017). *USER'S MANUAL FOR SAFIR 2016c A COMPUTER PROGRAM FOR ANALYSIS OF STRUCTURES SUBJECTED TO FIRE*. Retrieved from https://www.uee.uliege.be/upload/docs/application/pdf/2017-12/003_users_manuel_of_safir_2016_-_mechanical.pdf
- Gardner, L. (2005). The use of stainless steel in structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 7, 45–55.
- Gazeta da Beira. (2018). Evolução das obras do Balneário Romano das Termas de S. Pedro do Sul | Gazeta da Beira. Retrieved May 19, 2019, from <https://gazedadabeira.pt/evolucao-das-obras-do-balneario-romano-das-termas-de-s-pedro-do-sul/>
- Helzel, M. (2002). *Stainless Steel Facades*. (Euro Inox, Ed.) (Vol. 2).
- Hendrickson, C. (1998). *Project Management for Construction*. Retrieved from <http://pmbook.ce.cmu.edu/>
- Immobilier neuf. (2017). Immobilier neuf : grand luxe sur l'île de la Jatte | IMMONEUF. Retrieved June 11, 2019, from <https://www.immoneuf.com/actualites/immobilier-neuf-grand-luxe-sur-l-ile-de-la-jatte/a19285>
- ISSF. (2016). *Stainless Steel in Infrastructure*. worldstainless.org.
- Kosmač, A. (2012). *Materials and Applications Series: Stainless steels at high temperatures* (1st ed., Vol. 18). Euro Inox.
- Kotecki, D., & Armao, F. (2003). *Welding guide. Stainless Steels* (Vol. 129). The Lincoln Electric Company. <https://doi.org/10.1038/129356a0>
- Linkcity. (2019). «Les Hauts d'Asnières», une nouvelle opération multi-produits de Linkcity » Linkcity » Actualités. Retrieved June 25, 2019, from <https://www.linkcity.com/les-hauts-dasnieres-une-nouvelle-operation-multi-produits-de-linkcity/>
- Lopes, N. (2009). *Behaviour of stainless steel structures in case of fire*. Universidade de

- Aveiro.
- Lopes, N. (2019). Estruturas em aço inoxidável.
- Lopes, N., & Vila Real, P. M. M. (2014). Class 4 stainless steel I beams subjected to fire. *Thin Walled Structures*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.02.005>
- Manuel, M. (2016). *Resistência ao fogo de vigas-colunas tubulares em aço inoxidável*. Universidade de Aveiro.
- Neves, P. (2019). Câmara organiza Visitas Comentadas — e gratuitas — à Fundação Champalimaud. Retrieved June 30, 2019, from <https://nit.pt/out-of-town/back-in-town/camara-cria-visitas-comentadas-gratuitas-fundacao-champalimaud>
- Outokumpu. (2014). Buildings & Infrastructure.
- Outokumpu. (2018). Recycling and production | Outokumpu.
- Paris Property Associates. (2018). Place Felix Eboué – Paris 75012 | Paris property associates. Retrieved April 1, 2019, from <http://parispropertyassociates.fr/place-felix-eboue-paris-75012-001/>
- Pilcher, L. (2015). FAQ 10: Thermal Expansion and Design of Stainless Steel Fabrications. Retrieved December 3, 2018, from <https://www.assda.asn.au/technical-info/technical-faqs/faq-10-thermal-expansion-and-design-of-stainless-steel-fabrications/272-a-walk-to-remember>
- Real, E., & Mirambell, E. (2003). “Discussion of “Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys [Journal of Constructional Steel Research 2003;59:47–61].” *Journal of Constructional Steel Research*, 59, 1321–1323.
- Ribeiro, J. (2017). Projeto de Valorização, Conservação e Reabilitação das Termas Romanas de S. Pedro do Sul. Retrieved May 19, 2019, from <http://www.construcaomagazine.pt/noticias/projeto-de-valorizacao-conservacao-e-reabilitacao-das-termas-rom/>
- Rodrigues, F. (2017). Apontamentos da disciplina de Legislação Direcção de Obras. Universidade de Aveiro.
- Rossi, B. (2014). Discussion on the use of stainless steel in constructions in view of sustainability. *Thin Walled Structures*, 83, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.01.021>
- Rostan Tensile Architecture. (2018). Melbourne City Council Chambers - Northern Green Facade. Retrieved December 3, 2018, from <https://www.ronstantensilearch.com/melbourne-city-council-chambers-northern-green-facade/>

- SCI. (2011). Parliament Library Building Domes.
- SCI. (2017). *Design manual for structural stainless steel* (4th ed.).
- Semedo, J. (2009). *DIRECÇÃO DE OBRA FORA DE PORTUGAL: PREPARAÇÃO INDIVIDUAL*. Retrieved from <http://www.fe.up.pt>
- Simões da Silva, L., & Gervásio, H. (2007). *Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas: métodos avançados*. (CMM, Ed.).
- Simões da Silva, L., Simões, R., & Gervásio, H. (2010). *Design of Steel Structures* (1st Editio). ECCS.
- SSINA. (2010). Stainless steel the green material.
- Vianova. (2018). Programme immobilier neuf Suresnes (92150) - Côté Seine | Vianova. Retrieved June 11, 2019, from <https://vianova-groupe.fr/programmes-neufs/logements-neufs-ile-de-france/hauts-de-seine/suresnes-92150/cote-seine>
- Vila Real, P. M. M. (2003). *Incêndio em estruturas metálicas - cálculo estrutural*. Edições Orion.
- Wikipedia. (2015). Farol da Ponta dos Capelinhos – Wikipedia. Retrieved June 30, 2019, from https://de.wikipedia.org/wiki/Farol_da_Ponta_dos_Capelinhos

Anexos

Relatório das atividades desenvolvidas durante o estágio

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	2
ÍNDICE DE TABELAS	4
Anexo: Relatório das atividades desenvolvidas durante o estágio.....	5
1. Introdução.....	5
1.1 Apresentação da empresa	5
1.2 Tarefas executadas: medição, orçamentação e cálculo estrutural	6
2. Obras acompanhadas.....	8
3. Trabalho desenvolvido.....	13
3.1 Orçamentação	13
3.1.1 Considerações gerais	13
3.1.2 Obras orçamentadas	16
3.2 Cálculo de estruturas metálicas	22
3.2.1 Considerações gerais	22
3.2.2 Estruturas calculadas.....	22

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura A 1 Arestalfer (“Arestalfer Empresa,” 2019).....	6
Figura A 2 Le Belvédère: Lote A (Forten, 2018).....	8
Figura A 3 Le Belvédère: Lote B (Forten, 2018).....	8
Figura A 4 Ivry Sur Seine	9
Figura A 5 Courbevoie A4B (Courbevoie, 2018).....	9
Figura A 6 Félix Éboué (Paris Property Associates, 2018).....	10
Figura A 7 Escola de Medicina de Genebra (Architech SA, 2016)	10
Figura A 8 Surennes T4 (Vianova, 2018)	10
Figura A 9 Asnier Lot A1 (Linkcity, 2019)	11
Figura A 10 Île la Jatte (Immobilier neuf, 2017)	11
Figura A 11 Clairsiennne (Clairsiennne le mag, 2017).....	12
Figura A 12 Musée Carnavalet (Courbis, 2016)	12
Figura A 13 Folha de medições.....	14
Figura A 14 Folha de orçamento.....	15
Figura A 15 Exemplo de orçamento	15
Figura A 16 Exemplo de medição para guarda-corpos	17
Figura A 17 Exemplo da folha de orçamento para o artigo de guarda-corpos.....	18
Figura A 18 Exemplo do aspeto de orçamento a entregar ao cliente	19
Figura A 19 Exemplo de um mapa de quantidades.....	20
Figura A 20 Mapa de quantidades - Cobertura na Suíça.....	20
Figura A 21 Orçamento - Cobertura na Suíça.....	21
Figura A 22 Exemplo da aplicação das ações variáveis de sobrecarga	23
Figura A 23 Momento fletor segundo y (M_y) – Île la Jatte	24
Figura A 24 Esforço de corte segundo z (F_z) – Île la Jatte	24
Figura A 25 Esforço axial segundo x (F_x) – Île la Jatte.....	25
Figura A 26 Relatório de cálculo para o corrimão – Île la Jatte.....	25
Figura A 27 Deslocamentos - Île la Jatte	26
Figura A 28 Reações nos apoios para a combinação mais gravosa em ELU – Île la Jatte	26
Figura A 29 Ligação do guarda-corpos ao suporte de betão – Île la Jatte	27
Figura A 30 Situações de cargas consideradas para verificação da segurança da escada helicoidal: (a) peso próprio e restantes cargas permanentes; (b) ação variável: sobrecarga distribuída; (c) ação variável: sobrecarga pontual; (d) ação variável; sobrecarga na guar	28
Figura A 31 Condições de apoio da escada helicoidal.....	28
Figura A 32 Modelos da escada helicoidal - Clairsiennne.....	29
Figura A 33 Reações nos apoios para o caso de carga mais gravoso.....	30
Figura A 34 Verificações de segurança da cavilha	31
Figura A 35 Tensões na cavilha	31
Figura A 36 Deformações na cavilha.....	32
Figura A 37 Modelo da estrutura em treliça	32
Figura A 38 Situações de cargas consideradas para verificação da segurança da estrutura em treliça: (a) peso próprio da estrutura e (b) ações variáveis	33
Figura A 39 Momento fletor segundo y (M_y) – Musée Carnavalet: estrutura em treliça...34	34
Figura A 40 Esforço de corte segundo z (F_z) – Musée Carnavalet: estrutura em treliça...34	34
Figura A 41 Esforço axial segundo x (F_x) – Musée Carnavalet: estrutura em treliça	35
Figura A 42 Tensões nas chapas de ligação – Musée Carnavalet.....	35
Figura A 43 Relatório de cálculo para uma das barras mais esforçadas – Musée Carnavalet: estrutura em treliça.....	36

Figura A 44 Deslocamentos – Musée Carnavalet: estrutura em treliça	36
Figura A 45 Reações nos apoios – Musée Carnavalet: estrutura em treliça	37
Figura A 46 Verificação de uma ligação aparafusada – Musée Carnavalet: estrutura em treliça	38
Figura A 47 Relatório de cálculo de uma ligação ao betão – Musée Carnavalet: estrutura em treliça	39
Figura A 48 Modelo do pórtico metálico 1 – Musée Carnavalet	39
Figura A 49 Casos de carga: Pórtico metálico 1, (a) Peso próprio, (b) Carga dinâmica – Musée Carnavalet	40
Figura A 50 Momento fletor segundo y (M_y) – Musée Carnavalet: pórtico metálico 1	41
Figura A 51 Esforço de corte segundo z (F_z) – Musée Carnavalet: pórtico metálico 1	41
Figura A 52 Esforço axial segundo x (F_x) – Musée Carnavalet: pórtico metálico 1	42
Figura A 53 Deslocamentos – Musée Carnavalet: pórtico metálico 1	42
Figura A 54 Ligação aparafusada pilar-viga-travamento – Musée Carnavalet: pórtico metálico 1	43
Figura A 55 Ligação aparafusada viga-viga – Musée Carnavalet: pórtico metálico 1	43
Figura A 56 Ligação aparafusada entre travamentos – Musée Carnavalet: pórtico metálico 1	44
Figura A 57 Modelo do pórtico metálico 1 – Musée Carnavalet	44
Figura A 58 Momento fletor segundo y (M_y) – Musée Carnavalet: pórtico metálico 2	45
Figura A 59 Esforço de corte segundo z (F_z) – Musée Carnavalet: pórtico metálico 2	45
Figura A 60 Esforço axial segundo x (F_x) – Musée Carnavalet: pórtico metálico 2	46
Figura A 61 Deslocamentos – Musée Carnavalet: pórtico metálico 2	46
Figura A 62 Modelo das escoras – Musée Carnavalet	47
Figura A 63 Situações de cargas consideradas para verificação da segurança das escoras – Musée Carnavalet	47
Figura A 64 Momento fletor segundo y (M_y) – Musée Carnavalet: escoras	48
Figura A 65 Esforço de corte segundo y (F_y) – Musée Carnavalet: escoras	48
Figura A 66 Esforço axial segundo x (F_x) – Musée Carnavalet: escoras	48
Figura A 67 Relatório de cálculo para uma das barras mais esforçadas – Musée Carnavalet: escoras	49
Figura A 68 Deslocamentos – Musée Carnavalet: escoras	49
Figura A 69 Relatório de cálculo de uma ligação ao betão – Musée Carnavalet: escoras	50

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela A 1. Cargas consideradas - Île la Jatte.....	23
Tabela A 2 Combinação de ações - Île la Jatte	24
Tabela A 3 Combinação de ações - Clairsienne.....	29
Tabela A 4 Cargas consideradas - Estrutura em treliça	33
Tabela A 5 Combinação de ações - Estrutura em treliça	33
Tabela A 6 Combinação de ações - Pórtico metálico 1.....	40

ANEXO: RELATÓRIO DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS DURANTE O ESTÁGIO

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo será dedicado à apresentação do trabalho desenvolvido ao longo do estágio curricular realizado na empresa Arestalfer S.A., em Sever do Vouga, 3 dias por semana, perfazendo 24h semanais, durante 5 meses.

Numa primeira fase, as funções desempenhadas durante o período de estágio foram no departamento comercial da empresa a realizar orçamentos e medições de estrutura metálica e serralharias. Posteriormente, houve oportunidade de desempenhar função de projetista no gabinete de projeto da empresa,

1.1 Apresentação da empresa

A Arestalfer (Figura A 1) conta com mais de três décadas de atividade no sector da construção metálica. Projeta, fabrica e monta estruturas metálicas e serralharias em aço carbono ou aço inoxidável para construção civil e indústria.

A empresa conta com a experiência acumulada ao longo dos anos que se traduz na organização, determinação e motivação para alcançar objetivos, voltada para melhoria contínua e refletindo-se num trabalho de qualidade.

Em 1996, a empresa entrou para o Grupo Martifer sendo que em 2005 tinha o nome de Martifer II Inox, S.A., saindo em 2011, passando então à designação de Arestafer S.A. (Arestalfer, 2015).

Graças ao trabalho de qualidade desenvolvido, a empresa, desde 2008, tem vindo a expandir a sua área de atuação para mercados estrangeiros, investindo em novas instalações, softwares, equipamentos e formação profissional e, em 2014, foi constituída a Arestalfer France, que se dedica à comercialização, gestão de projeto e montagem de obras de construção metálica e serralharias em França. Mantém ainda atividade no mercado Angolano em parceria com a empresa angolana Fercat (Arestalfer, 2015).

Atualmente, conta com uma área coberta de aproximadamente 10.000 m², dividida em naves dotadas de meios elevatórios e equipamentos necessários à confeção de serralharias e estruturas metálicas (“Arestalfer | Empresa,” 2019).

A empresa aposta na especialização como forma de ser competitiva face aos concorrentes, participando em projeto com elevado grau de exigência, criando oportunidade de conceber produtos que vão ao encontro às necessidades específicas de cada cliente (Arestalfer, 2015).



Figura A 1 Arestalfer (“Arestalfer | Empresa,” 2019)

1.2 Tarefas executadas: medição, orçamentação e cálculo estrutural

O orçamento é um elemento essencial para uma obra de construção, pois, para além de ser uma estimativa dos custos reais que a obra acarretará, consiste também na descrição do projeto, contendo capítulos ou artigos que a constituem (Faria, 2014).

O trabalho do orçamentista passa por estimar os custos que determinada obra terá, potenciando os seus lucros, para isso, deve saber efetuar medições e conhecer os processos construtivos envolvidos, pois a ocorrência de erros na fase de orçamentação implicará custos acrescentados para a sua empresa (Hendrickson, 1998).

A medição tem como objetivo a quantificação de uma determinada tarefa sendo que, para a estimativa de custo, a medição é efetuada sobre o projeto da obra.

Juntamente com o Caderno de Encargos, as medições são os documentos base para os estudos de proposta de preços. Um caderno de encargos explícito e organizado é fundamental para que se consiga um orçamento bem feito pois, quanto mais conhecimento sobre a obra dispor o orçamentista, mais preciso e fiável será o orçamento, trazendo, assim, benefícios tanto para a empresa consultada para fornecer orçamento, como para o dono de obra (Semedo, 2009).

Relativamente ao dimensionamento de estrutura metálica, este pressupõe que o engenheiro civil projetista esteja a par da legislação e informação técnica necessária para o correto desenvolvimento das suas funções.

O Eurocódigo 3 (EC3) é a ferramenta mais importante, na Europa e noutros países que o adotam, no cálculo de estrutura metálica, sendo que cada país possa ter outras legislações próprias complementares a serem seguidas. Em paralelo com o EC3, as normas EN 1990 Eurocódigo 0: Bases de Projecto (CEN, 2009), EN 1991 Eurocódigo 1: Ações em Estruturas , EN 1997 Eurocódigo: Projeto Geotécnico (CEN, 2010b) e EN 1998 Eurocódigo 8: Disposições para Projecto de Estruturas Resistentes aos Sismos, constituíram também elementos essenciais para o dimensionamento realizado neste estágio.

Uma estrutura deve ser dimensionada e executada de modo a que cumpra as funções para as quais foi concebida durante o seu tempo de vida útil. Para que isto aconteça, condições que impeçam colapso, correspondentes a estados limites últimos, condições que garantam bom desempenho em serviço, correspondentes a estados limites de utilização, e ainda, condições relacionadas com durabilidade devem ser salvaguardadas (Simões da Silva, Simões, & Gervásio, 2010).

O Estado Limite Último associa-se ao colapso da estrutura, o que implica perigo de segurança para pessoas. São considerados estados limites de resistência, de estabilidade e perda de equilíbrio.

O Estado Limite de Utilização corresponde ao estado no qual as condições de utilização já não se verificam. Nas estruturas metálicas, geralmente, são considerados estados limites de vibração e deformação.

No decorrer do estágio houve oportunidade de experienciar as atividades que são desenvolvidas por um orçamentista e por um engenheiro de projeto. Nos capítulos seguintes, serão apresentadas as obras acompanhadas durante o decorrer do estágio, bem como as atividades desenvolvidas.

2. OBRAS ACOMPANHADAS

O estágio na empresa Arestalfer constitui no acompanhamento de obras pertencentes ao sector Arestalfer France.

De seguida, será feita a apresentação e contexto de cada obra acompanhada.

Le Belvédère

Localizada na margem direita do rio Garonne a poucos minutos a pé da ponte Saint-Jean, o bairro de Belvédère contará com a construção desta nova obra de edificação residencial na cidade de Bordéus, França. Será constituída por dois lotes de alojamentos A (Figura A 2) e B (Figura A 3), conta com 176 alojamentos residenciais, dois níveis de estacionamento subterrâneo e 196 lugares de estacionamento para bicicletas (Bureau de Vente, 2018).



Figura A 2 Le Belvédère: Lote A (Forten, 2018)



Figura A 3 Le Belvédère: Lote B (Forten, 2018)

Ivry Sur Seine

A arquitetura urbana e moderna, aliada a zonas verdes, tem como propósito destacar esta edificação das demais. Projeto localizado em Paris, França, destinado a habitação composto por 98 alojamentos distribuídos por 4 lotes (Figura A 4).



Figura A 4 Ivry Sur Seine

Courbevoie A4B

Courbevoie (Figura A 5) tem como atrativos a proximidade com a área empresarial de La Défense e com a capital. O seu património histórico, espaços verdes, instalações desportivas e o dinamismo cultural são características desta zona.

Esta obra, que faz parte de um projeto de requalificação da cidade, será localizada ao lado da antiga fábrica Delage e será composta por 543 locais de habitação, um grupo escolar, 175 residências para estudantes e 13 espaços de comércio (Courbevoie, 2018).



Figura A 5 Courbevoie A4B (Courbevoie, 2018)

Félix Éboué

Numa parte dinâmica da cidade de Paris, França, no 12.º bairro, a praça dedicada a Félix Éboué dá nome a esse projeto. A obra será composta por dois edifícios residenciais, um com 11 pisos e 57 alojamentos e outro com 9 pisos e 47 apartamentos com parque de estacionamento no subsolo e espaços de comércio ao nível do rés do chão representados na Figura A 6.

A arquitetura assemelha-se à forma de um anfiteatro em volta de uma área verde comum aos dois lotes. Alguns dos apartamentos têm terraços verdes e ainda acesso a coberturas ajardinadas (Paris Property Associates, 2018).



Figura A 6 Félix Éboué (Paris Property Associates, 2018)

Cobertura na Suíça

Esta obra faz parte de uma intervenção de reabilitação e expansão da Escola de Medicina em Genebra, Figura A 7.

Projetada pelos arquitetos Reverdin, Gouy e Gampert, esta escola foi inaugurada em 1876 com instalações comparáveis às das melhores universidades europeias da altura.



Figura A 7 Escola de Medicina de Genebra (Architech SA, 2016)

Surenes T4

Situada na parte oeste de Paris e a poucos minutos de La Défense, esta edificação (Figura A 8) imobiliária acomodará apartamentos até tipologia T5. A área de Surenes oferece um ambiente agradável, a 5 minutos a pé do centro da cidade e das margens do rio Sena (Vianova, 2018).



Figura A 8 Surenes T4 (Vianova, 2018)

Asniere Lot A1

Situada no distrito de Hauts d'Asnières, esta obra consiste na edificação de duas residências de serviços e comércio compreendendo, 99 estúdios para investigadores, 234 residências para estudantes de tipologia T1 e T2, espaços partilhados, ginásio, sala de reuniões e terraços acessíveis, 76 apartamentos para aluguer social e 37 para aluguer de curto prazo, restaurantes, centro médico e 200 m² para comércios.



Figura A 9 Asnier Lot A1 (Linkcity, 2019)

Île la Jatte

Localizada num ambiente calmo e discreto, entre Paris e La Défense, na região disputada de Neuilly-sur-Seine, será implantada esta edificação (Figura A 10).

Criado pela Bouygues Immobilier e Sogeprom, esta edificação residencial com vista para o rio Sena, contará com 284 apartamentos. A arquitetura da fachada voltada para o lado parisiense foi inspirada na Art Deco dos anos 30 e a voltada para o distrito La Défense, teve inspiração nas curvas do Sena, conferindo uma imagem contemporânea (Immobilier neuf, 2017).



Figura A 10 Île la Jatte (Immobilier neuf, 2017)

Clairsienne

Esta edificação (Figura A 11) localizada no Quartier de l'Ars em Bordéus, é destinada a uma pluralidade de usuários. Com arquitetura inovadora, está destinada a 130 apartamentos para alugar, 70 apartamentos intergeracionais, 59 apartamentos de habitação social, 7000 m² de escritórios, um café, uma creche, sala de estar comum com 110 m² e espaço verde com 1200 m² (Clairsienne le mag, 2017).



Figura A 11 Clairsienne (Clairsienne le mag, 2017)

Musée Carnavalet

Esta obra consiste numa renovação que aumentará significativamente a capacidade do museu.

O Musée Carnavalet (Figura A 12) é um grande museu histórico de Paris. Na sua coleção estão incluídas mais de 600 000 obras, fazendo com que seja um dos principais museus franceses.

Instalado nos hotéis Carnavalet e Le Peletier de Saint.Fargeau, no centro de Paris, um dos bairros em que o património arquitetónico pré-hispânico foi conservado, este museu está localizado numa zona de grande afluência turística, recebendo todos os anos cerca de 500 000 visitantes (Courbis, 2016).



Figura A 12 Musée Carnavalet (Courbis, 2016)

3. TRABALHO DESENVOLVIDO

A primeira fase do estágio passou pelo sector comercial da empresa, desempenhado as tarefas de orçamentista. Na fase final, houve a possibilidade de passar para o gabinete de projeto da empresa e desempenhar as atividades de projetista.

3.1 Orçamentação

3.1.1 Considerações gerais

Pode-se definir orçamento, como a forma de se obter o custo de uma obra em que uma descrição do projeto é feita pelos capítulos e artigos que o constituem.

Um orçamento é organizado em capítulos e artigos que representam uma determinada tarefa da obra. Assim, cada capítulo é constituído por artigos tecnicamente semelhantes.

A elaboração de um orçamento pressupõe uma sequência de operações começando pelo estudo do projeto, organização ou elaboração do mapa de quantidades, cálculo dos preços de venda e por fim a elaboração de um articulado final com a descrição dos artigos calculados e seus respectivos preços.

Sendo o trabalho desenvolvido pertencente ao sector francês da empresa, foi necessário tomar conhecimento dos documentos, normas e orientações seguidas em França.

O documento guia para a elaboração dos orçamentos é o designado por CCTP (*Cahier des Clauses Techniques Particulières*), que corresponde ao Caderno de Encargos em Portugal. No CCTP, são apresentadas todas as especificações pretendidas no projeto desde uma descrição breve do enquadramento da obra, normas a serem seguidas pela empresa contratada, tratamento de finalização dos elementos e descrição de todos os artigos que devem constar no orçamento. É com base na descrição feita pelo CCTP que todo o orçamento é feito, pois é nele que constam informação detalhada sobre cada elemento como, no caso de um guarda corpos, o tipo de perfis metálicos de que será construído, tipo de fixações que terá, que matérias serão usados, onde se localizará e que tipo de tratamento de superfície deverá ter.

Para a realização de orçamentos, a ferramenta utilizada foi o Microsoft Excel. A empresa dispõe de uma folha de cálculo com todos os parâmetros que devem integrar o orçamento como, valores de produtividade ou custo/hora de mão-de-obra.

Figura A 14 Folha de orçamento

De todos os cálculos necessários para elaborar o orçamento, o que é importante para o cliente é o preço unitário de cada artigo. Assim, o aspeto do orçamento que é entregue ao cliente é o da Figura A 15.



Figura A 15 Exemplo de orçamento

3.1.2 Obras orçamentadas

Nesta secção, serão apresentadas as obras cujo o orçamento foi realizado durante o estágio. Será explicado em que consistiu cada orçamento e o que foi necessário fazer.

Le Belvédère

Nesta obra foi necessário realizar medição de todos os artigos que compoñham a memória descritiva, CCTP, para depois se proceder à orçamentação. Para isso, teve de se estudar o projeto de maneira a identificar a localização de cada artigo referido no CCTP para que posteriormente se procedesse à medição dos mesmos.

Antes de se iniciar o processo de orçamentação, é essencial ler as indicações que constam no CCTP para que sejam retiradas informações como os materiais que serão usados, o tipo de tratamento superficial que os elementos metálicos terão, normas que deverão ser seguidas, obrigações da empresa na durante a prestação dos serviços ou as garantias a ser dadas.

Neste projeto, todos os elementos metálicos colocados no exterior dos edificios teriam tratamento superficial de galvanização a quente e lacagem aplicados em fábrica com certificação QUALICOAT, já os elementos interiores teriam apenas uma pintura de proteção anticorrosão, também aplicada em fábrica.

O certificado QUALICOAT (*Association for Quality Control in the Lacquering, Painting and Coating Industry*) confere uma licença de marca de qualidade destinada a promover e manter a qualidade do revestimento por lacagem ou pintura com tinta líquida das superfícies metálicas. Em Portugal, esta certificação está a cargo da APAL (*Associação Portuguesa do Alumínio*).

O orçamento foi dividido em localizações sendo que primeiramente foi orçamentado tudo o que era pedido para a zona de estacionamento subterrâneos, de seguida o Lote B e por fim o Lote A.

No primeiro artigo, correspondente ao parque de estacionamento, constavam os seguintes artigos a orçamentar: portão automático de entrada, vedações metálicas, portões em vedações de acesso para pessoas e guarda-corpos de escadas.

Os elementos que compoñham o segundo artigo do orçamento eram: guarda-corpos com balaústre em vidro, guarda-corpos com balaústre vertical em tubos RHS, corrimãos para o núcleo de escadas interior, equipamentos para estacionamento de bicicletas, porta metálicas

Figura A 17 Exemplo da folha de orçamento para o artigo de guarda-corpos

No final, o orçamento entregue ao cliente é composto por:

- Na Figura A 18 é apresentado o aspeto que o orçamento toma quando está pronto para entregar ao cliente.

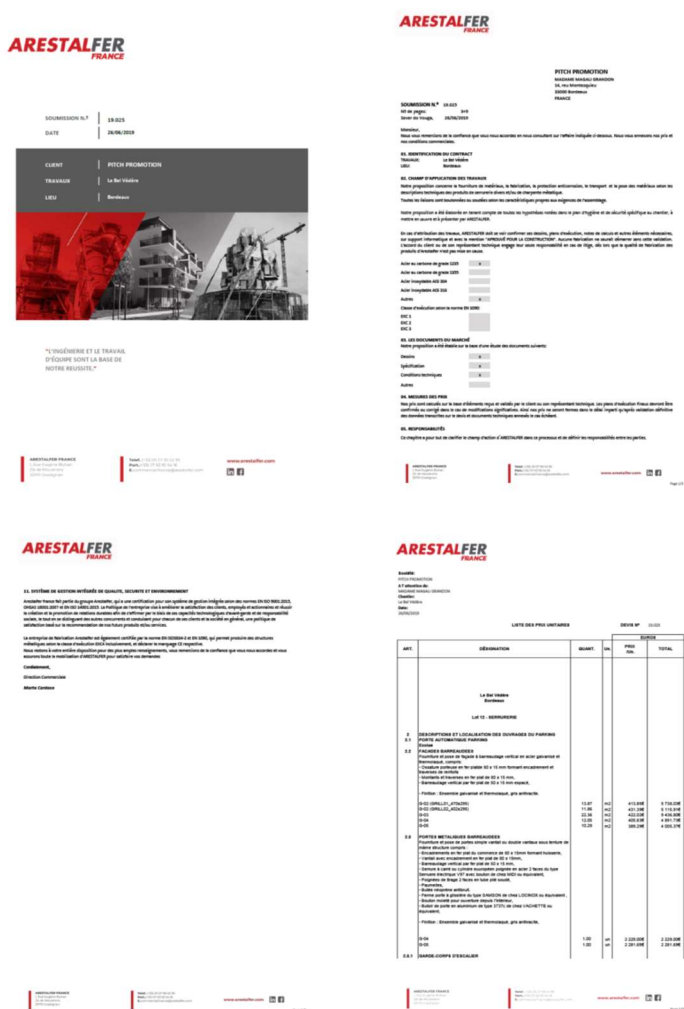


Figura A 18 Exemplo do aspeto de orçamento a entregar ao cliente

A obra Le Belvédère foi a única em que foi necessário proceder à medição de todos os elementos. Nas restantes obras orçamentadas, o mapa de quantidades foi fornecido.

A orçamentação das obras Ivry Sur Seine, Courbevoie A4B, Félix Éboué, Suresnes T4 e Asniere Lot A1 foi bastante semelhante ao que foi descrito para a obra Le Belvédère. Foram orçamentos composto essencialmente por artigos de serralharias em que o mapa de quantidades foi fornecido. A Figura A 19 ilustra um exemplo de um mapa de quantidades fornecido pelo cliente.

Figura A 19 Exemplo de um mapa de quantidades

Cobertura na Suíça

Este orçamento consistia em orçamentar a estrutura de uma cobertura composta por perfis HEA800, IPE300, HEB300, LNP80x8, IPE180 e LNP60x6. Junto com o pedido de cotação da obra vinham as plantas da cobertura, detalhes das ligações metálicas entre os perfis e o mapa de quantidades (Figura A 20). No caso de estrutura metálica, as medições são feitas em kg de aço e o preço é dado também por quilograma de estrutura.

art.	objets	u	qtes nettes	p.u.	coût	total
321	CONSTRUCTION MÉTALLIQUE					
500	Fabrication et fourniture des matériaux comprenant de manière non exhaustive : la fourniture et fabrication ainsi que tous les éléments nécessaires à la fabrication et l'ensemble de la sous-structure au montage.					
	Commentaire : Moyens d'assemblage boulonnés et/ou soudés et toute plaque et railleur dont le poids est compris dans le montage et démontage.					
10	Sommiers HEA800, S235, longueur env. 15,00 mètres. Assemblage sur colonnes béton par boulons, assemblages sur murs béton par incrustés. Y compris contre-flèche en 2 points de 50 mm	kg	12'500,0			
20	Sommiers HEA300, S235, longueur env. 7,50 mètres. Assemblage sur murs béton par incrustés.	kg	2'150,0			
30	Plus-value sur articles 10 et 20 pour réalisation d'ouvertures rectangulaires dimensions jusqu'à 800x500mm, y compris renforts.	€	25,0			
40	Plus-value sur articles 10 et 20 pour réalisation d'ouvertures rectangulaires dimensions jusqu'à 800x500mm, y compris renforts.	€	10,0			
50	Sommiers de rive HEA800, boulonnés sur colonnes béton, assemblages en continu par plaques frontales, S235, longueur de 7,50 à 15,00 mètres.	kg	12'250,0			
60	Pannes IPE300 S235, assemblages par écrous à 6 boulons, joint entre sommiers. Longueurs de 4,00 à 7,50 mètres.	kg	14'000,0			
70	Pannes HEA300 S235, assemblages par écrous à 6 boulons, joint entre sommiers. Longueurs de 4,00 à 7,50 mètres.	kg	4'500,0			
80	Plus-value sur article 60 pour soudure en quasi continu de L'INP60x6 sur les ailes des pannes.	kg	3'000,0			
90	Contreventements de toiture et de façade. Profils type LNP60x6.	kg	1'500,0			
100	Obstacles divers de toiture, type IPE180.	kg	1'500,0			
110	Éléments en fers plats type FLAFLB de 120x5 à 180x10 pour balustrades, soudés sur structure.	kg	1'500,0			

art.	objets	u	qtes nettes	p.u.	coût	total
120	Éléments en fers plats plats en L type FLAFLB de 120x5 à 180x10 pour support de toiture chevillés sur murs, éléments en acier galvanisé.	kg	1'900,0			
130	Barrotes sous pannes, type ICA 200x12 longueur 7500 mm à souder en quasi continu sous pannes.	kg	5'000,0			
140	Éléments de châssis technique pour COSE type HEA180, S235, assemblages par plaques frontales ou adhésives.	kg	4'500,0			
150	Éléments de châssis technique pour COSE type IPE180, S235, assemblages par plaques frontales ou adhésives.	kg	2'500,0			
160	Éléments de châssis technique pour COSE type HEA180, S235, assemblages par plaques frontales ou adhésives.	kg	300,0			
	Structure de locaux techniques					
170	Colonnes IPE180, S235, longueur jusqu'à 4,00 mètres.	kg	1'500,0			
180	Sommiers IPE180, S235, encastrés sur les colonnes par chapets frontales et boulons SFR, longueur jusqu'à 4,00 mètres.	kg	800,0			
190	Pannes IPE180, S235, assemblées par écrous entre sommiers, longueur jusqu'à 2,40 mètres.	kg	1'200,0			
200	Contreventements de toiture et de façade. Profils type LNP60x6.	kg	300,0			
210	Éléments divers soutiens de toiture et de façade. Profils type LNP60x6.	kg	500,0			
220	Éléments divers soutiens de toiture et de façade. Profils type LNP60x6.	kg	500,0			
	Sous-total Protection de surface					
10	Protection anticorrosion 1K-40, Teinte au choix du MO y compris toutes sables, sablage de 2.5. Classe d'exposition C2 intérieure.	m ²	1'800,0			
20	Plus-value sur article 10 pour coule de finition 1K-40, teinte 1K, au choix du MO pour meublerie.	m ²	255,0			
30	Plus-value éventuelle (non comptabilisée) sur article 10 pour coule de finition, teinte 1K, au choix du MO.	m ²	1'545,0			
40	Sablage à chaud de la structure des parties techniques.	kg	12'710,0			
	Sous-total Protection de surface					

Figura A 20 Mapa de quantidades - Cobertura na Suíça

Neste caso foi necessário consultar fornecedores para ter preços atualizados dos perfis metálicos necessários. Este orçamento consistia em orçamentar apenas o fornecimento da

estrutura e o seu transporte, a montagem da mesma ficaria a cargo de outra empresa. Na Figura A 21 encontra-se a folha de orçamento resultante.

[illegible]

Figura A 21 Orçamento - Cobertura na Suíça

3.2 Cálculo de estruturas metálicas

3.2.1 Considerações gerais

O cálculo de estruturas metálicas, pelos métodos clássicos, pode ser dividido em duas etapas de análise e verificação: primeiro, esforços internos e deslocamentos são avaliados com base nos princípios de equilíbrio e compatibilidade; de seguida, esses esforços internos e deslocamentos são comparados com a resistência, rigidez e ductilidade da estrutura de modo a garantir a segurança e adequação à finalidade da mesma.

O crescente conhecimento sobre o comportamento das estruturas metálicas, associado ao desenvolvimento de ferramentas de cálculo cada vez mais sofisticadas e de fácil utilização, permite que os resultados da análise estrutural sejam diretamente comparados com a aplicação de cargas e assim, um cálculo mais rápido (Simões da Silva & Gervásio, 2007).

Na maioria das aplicações, as estruturas metálicas são geralmente constituídas por ligações de peças lineares. Para proceder ao cálculo de estruturas metálicas com recurso a softwares, é necessário modelar a estrutura. A modelação de estruturas metálicas através de elementos lineares implica que sejam feitas considerações específicas como a escolha do eixo da secção, a influência, das excentricidades, secções variáveis e peças com eixo curvos e modelação das ligações (Simões da Silva & Gervásio, 2007).

Quando a análise e cálculo de estruturas metálicas é feita pelo método dos elementos finitos (FEM), é necessário combinar no modelo elementos lineares com elementos de duas e três dimensões para que os elementos se liguem corretamente (Simões da Silva et al., 2010).

O programa usado para o cálculo das estruturas foi o Autodesk Robot Structural Analysis Professional (Autodesk, 2019).

O *Robot* é um programa com capacidade para modelar, analisar e projetar estruturas, admitindo análise estrutural linear, não linear e dinâmica. Permite criar o modelo da estrutura, realizar a sua análise, verificar resultados obtidos, efetuar cálculos de verificação de acordo com diferentes legislações e preparar documentação para a estrutura calculada (Autodesk, 2008).

3.2.2 Estruturas calculadas

De seguida, serão apresentadas as estruturas que foram alvo de cálculo no decorrer do estágio.

Île la Jatte

Para esta obra, foram realizadas revisões a notas de cálculo já emitidas, onde se teve de proceder à verificação de todos os elementos que compoñham cinco tipos de guarda-corpos diferentes, pois foi necessário adicionar um novo caso de carga e calcular as ligações ao betão.

Os modelos de cálculo já estavam previamente feitos, foi apenas necessário adicionar um novo caso de carga que pretendia simular uma carga nos guarda-corpos no sentido de fora para dentro.

Para o cálculo das ligações, as ações consideradas foram o peso próprio das estruturas, sobrecarga na direção de dentro para fora, sobrecarga na direção de fora para dentro e a ação do vento. Na Tabela A 1 encontram-se um resumo das ações consideradas no modelo, sendo que o peso próprio é automaticamente considerado pelo programa de cálculo.

Tabela A 1. Cargas consideradas - Île la Jatte

Ação	Valor
Ação permanente: peso próprio	Automático
Ação variável: sobrecarga pelo interior	0.60 kN/m
Ação variável: sobrecarga pelo exterior	0.40 kN
Ação variável: vento	0.75kN/m ²

Neste caso, o guarda-corpos encontra-se fixo lateralmente entre paredes, simulado no programa de cálculo através de apoios duplos, que impedem translação segundo os eixos x, y e z. Na Figura A 22 encontra-se os esforços de sobrecarga aplicados nos devidos membros.

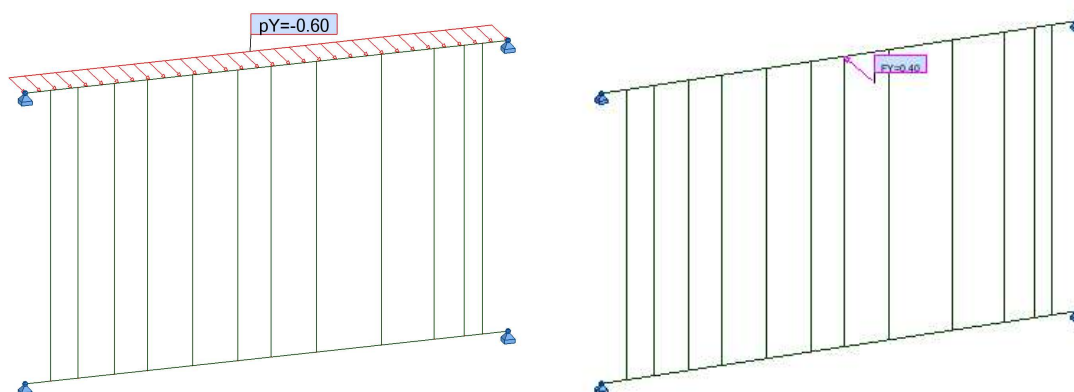


Figura A 22 Exemplo da aplicação das ações variáveis de sobrecarga

Depois de definidas todas as cargas a aplicar, tem de se definir as combinações de ações que o programa terá de considerar. Para este caso, as combinações de ações consideradas encontram-se sintetizadas na Tabela A 2.

Tabela A 2 Combinação de ações - Île la Jatte

Caso	Nome do caso	Natureza	Tipo de análise
200	1.35Gk+1.5Qk	Permanente	Combinação linear
201	1.35Gk+1.5Qk_2	Permanente	Combinação linear
300	1.0Gk+1.0Qk	Permanente	Combinação linear

Tendo as combinações de cargas definidas, as condições de apoio e todas as seções, têm-se condições para que o programa proceda ao cálculo da estrutura. Tendo terminado o cálculo, pode-se retirar do programa os diagramas de esforços pretendido pra a realização da nota de cálculo, para a combinação de esforços mais desfavorável.

Na Figura A 23, Figura A 24 e Figura A 25 encontram-se os diagramas de esforços.

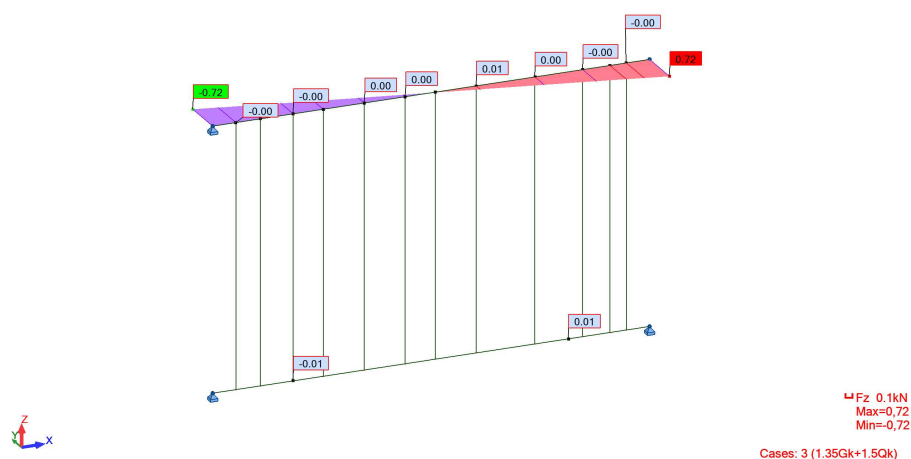


Figura A 23 Momento fletor segundo y (M_y) – Île la Jatte

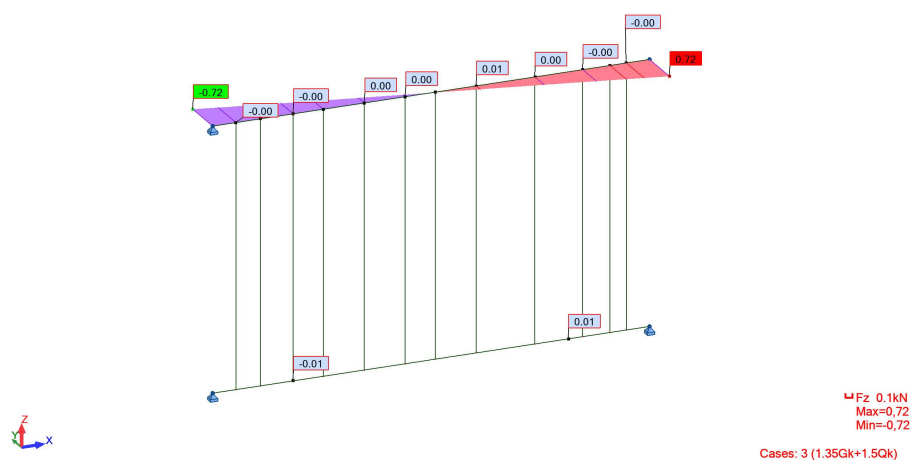


Figura A 24 Esforço de corte segundo z (F_z) – Île la Jatte

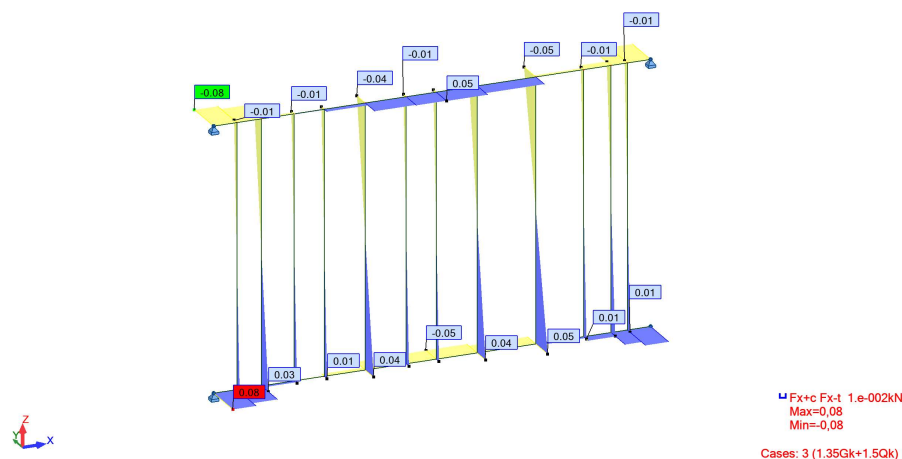


Figura A 25 Esforço axial segundo x (Fx) – Île la Jatte

Tendo todos os esforços calculados, é necessário apresentar os cálculos e considerações que foram tomadas no programa para proceder às verificações de segurança, sendo que este fornece um relatório detalhado de todo o que foi considerado. Na Figura A 26 apresenta-se o relatório de cálculo obtido através do *Robot* para o corrimão. Na nota de cálculo apresentam-se os cálculos de todos os elementos que constituem a estrutura do guarda-corpos.

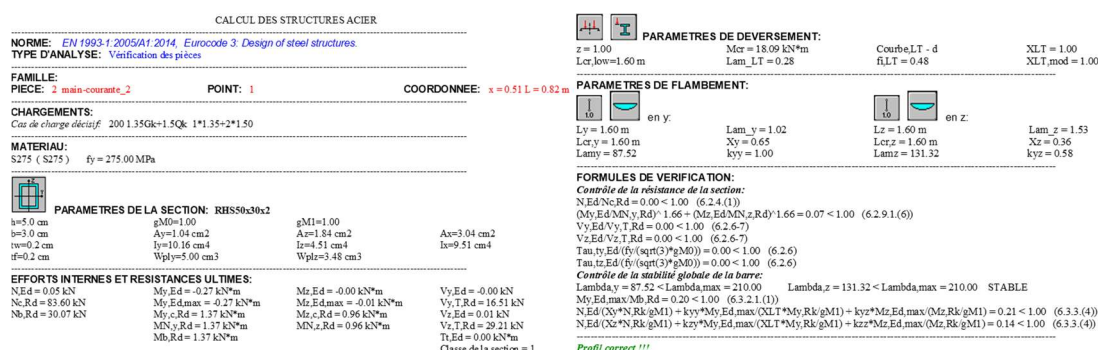


Figura A 26 Relatório de cálculo para o corrimão – Île la Jatte

Outro especto importante a ser verificado é a deformação. À semelhança do que acontece em outro tipo de estruturas, também para o guarda-corpos existem deformações máxima que não podem ser ultrapassadas. Os deslocamentos (Figura A 27) são obtidos para as combinações de Estado Limite de Serviço e, neste caso, para as barras horizontais da estrutura, a deformação não pode ser superior a $L/250$ e, para as barras verticais, $L/150$.

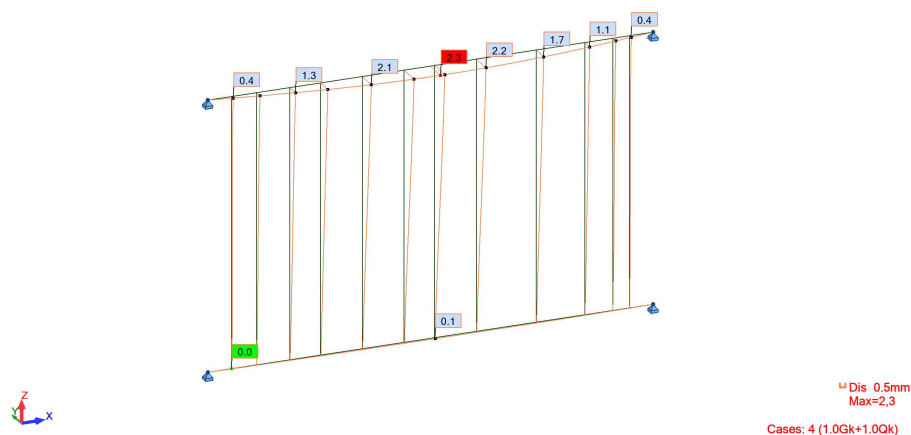


Figura A 27 Deslocamentos - Île la Jatte

Para efetuar o cálculo das ligações, retiram-se os esforços nos apoios, pois serão os esforços aos quais a ligação terá de resistir. Na Figura A 28 estão representados os esforços nos apoios para a combinação em Estado Limite Último (ELU) mais gravosos.

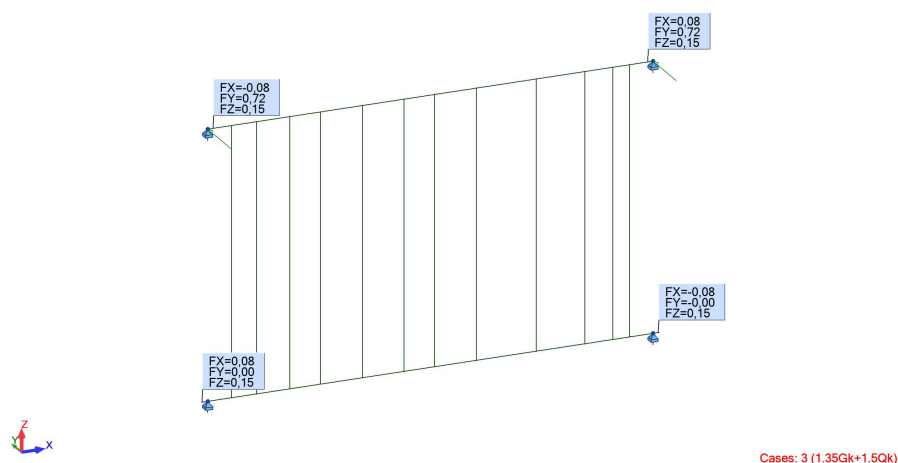


Figura A 28 Reações nos apoios para a combinação mais gravosa em ELU – Île la Jatte

Depois de serem conhecidos os esforços a que a ligação do guarda-corpos à parede de betão terá de resistir, procede-se ao dimensionamento da mesma através de um programa específico para o efeito como, o *FIXPERIENCE* da *Fischer*, o *PROFIS Anchor* da *HILTI* ou o *Idea StatiCa Steel*. Neste caso, o programa utilizado foi o *Idea StatiCa*, porque, para o tipo de ligação pretendido, os outros programas não se adequavam. Na Figura A 29 encontra-se a representação de ligação realizada no programa de dimensionamento de ligações metálicas.

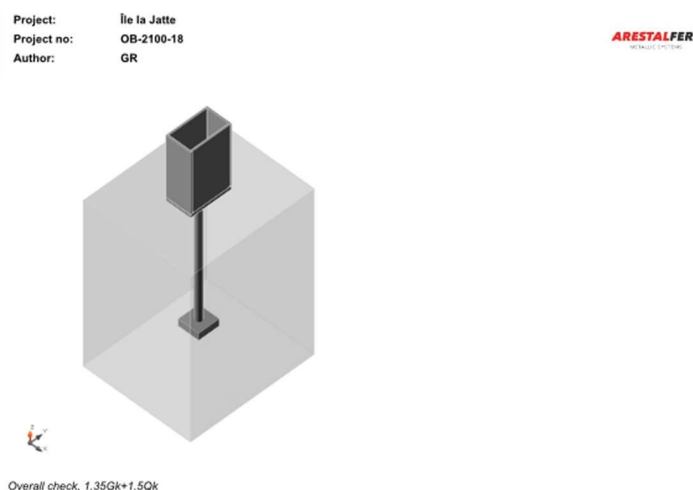


Figura A 29 Ligação do guarda-corpos ao suporte de betão – Île la Jatte

Clairsienne

Nesta obra, foi necessário elaborar uma nota de cálculo das reações nos apoios em diferentes casos de carga, para uma escada helicoidal. Para isso, começou-se por analisar o desenho da escada para conhecer a sua geometria e, assim, fosse possível proceder à modelação da mesma.

Para esta situação, foi criado um novo projeto no programa *Robot* escolhendo no menu inicialmente apresentado “Shell Design”, abrindo assim a janela para a modelação da estrutura onde se começa a modelar todos os elementos que a compõem com elementos de barra. Depois de modelar a estrutura é necessário definir as seções dos elemento, cargas, combinações e condições de apoio. Na Figura A 30, são apresentados os casos de carga considerados para a verificação da segurança da escada.

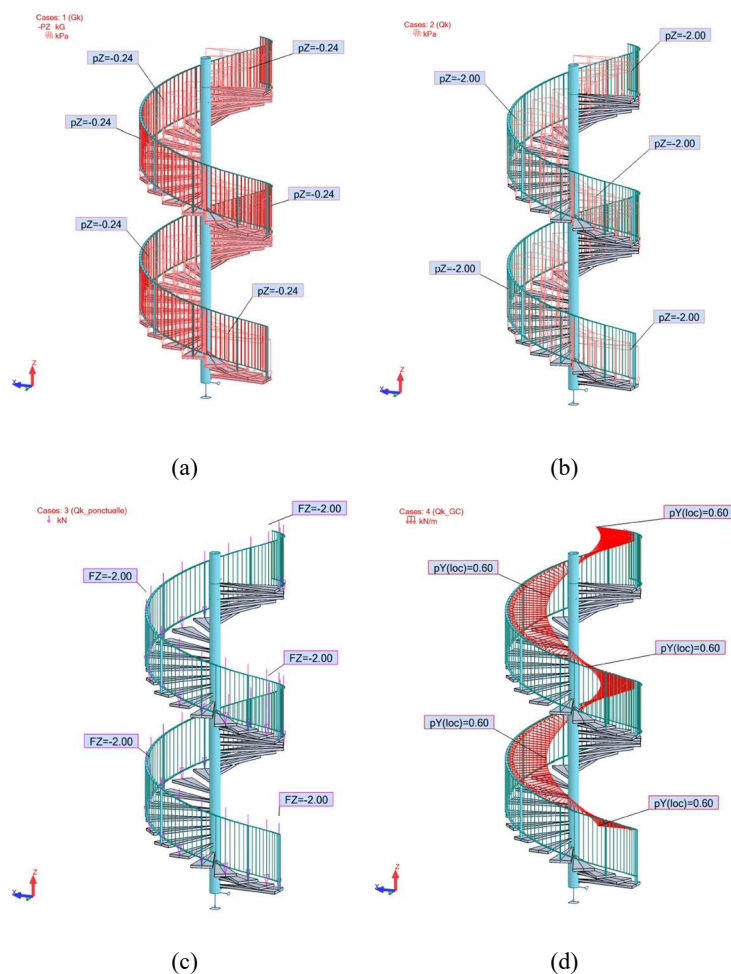


Figura A 30 Situações de cargas consideradas para verificação da segurança da escada helicoidal: (a) peso próprio e restantes cargas permanentes; (b) ação variável: sobrecarga distribuída; (c) ação variável: sobrecarga pontual; (d) ação variável; sobrecarga na guar

As condições de apoio da escada encontram-se representadas na Figura A 31.

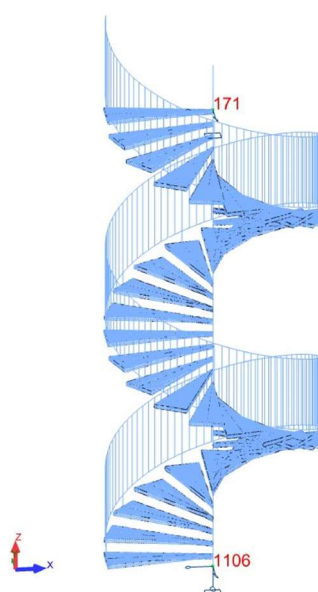


Figura A 31 Condições de apoio da escada helicoidal

Na Tabela A 3 são apresentadas as combinações de ações consideradas para o cálculo da estrutura.

Tabela A 3 Combinação de ações - Clairsienne

Caso	Nome do caso	Natureza	Tipo de análise
200	1.35Gk+1.5Qk+1.5Qk_GC	Permanente	Combinação linear
201	1.35Gk+1.5Qk_ponctuel+1.5Qk_GC	Permanente	Combinação linear
300	1.0Gk+1.0Qk+1.0Qk_GC	Permanente	Combinação linear
301	1.0Gk+1.0Qk_ponctuel+1.0Qk_GC	Permanente	Combinação linear

Depois de aplicadas as cargas e definidas as ações, procede-se ao cálculo do modelo e à visualização dos deslocamentos da estrutura, de modo a realizar uma avaliação preliminar para averiguar se a estrutura tem o comportamento esperado e se todos os elementos do modelo se encontram corretamente ligados.

Confirmando-se que a estrutura se comporta como esperado, passa-se para o menu de resultados do programa de cálculo e procede-se à verificação do dimensionamento dos elementos.

Nesta escada, os degraus apresentavam seção variável com um desenvolvimento em consola de 1400 mm, ligados a um pilar tubular de seção CHS 219,1 x 6 mm. O guarda-corpos seria composto por prumos em barra retangular de secção 50 x 10mm com 1100 mm de comprimento, balaústre em varão liso de 10 mm espaçados de 100 mm, corrimão e travessa inferior em barra retangular de secção 50 x 8 mm. Na Figura A 32 encontra-se representado o modelo da escada com as secções consideradas.

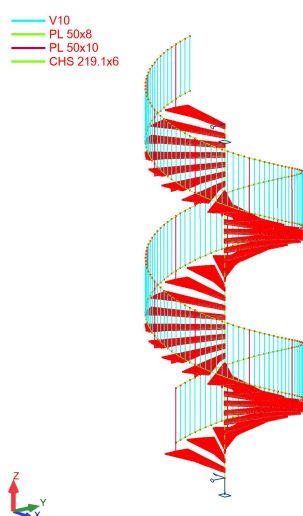


Figura A 32 Modelo da escada helicoidal - Clairsienne

Ao realizar a verificação da estrutura para as combinações consideradas, devido ao desenvolvimento dos degraus, foi necessário alterar a geometria apresentada no projeto até que fossem atingidos os valores necessários de resistência. Também se recorreu ao método dos elementos finito (MEF) para que fosse possível simular o comportamento dos degraus o mais próximo possível da realidade, chegando-se à conclusão de que estes deveriam ser construídos a partir de chapa de 10 mm de espessura tendo um reforço na parte inferior ao longo do desenvolvimento, também em chapa de 10 mm.

Na Figura A 33 apresenta-se, para a combinação de ações mais gravosa, as reações nos apoios da estrutura.

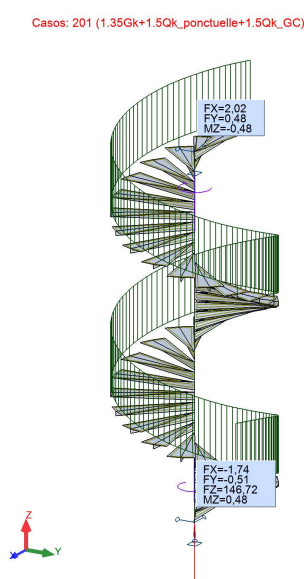


Figura A 33 Reações nos apoios para o caso de carga mais gravoso

Musée Carnavalet

Para o Musée Carnavalet foram calculadas cavilhas para a elevação de módulos de uma escada e ainda estruturas de elevação que serviriam de apoio à montagem da mesma.

- **Cavilhas**

As cavilhas de elevação têm como objetivo içar módulos de estrutura da escada, sendo que cada módulo teria um peso de cerca de 2000 kg. Para o cálculo da resistência, foi considerado que o peso dos módulos seria distribuído por duas cavilhas. As verificações de segurança necessárias foram feitas segundo a Parte 1-8 o EC3 (CEN, 2010a), numa folha de cálculo pré-criada pela empresa (Figura A 34).

Na folha de cálculo foi necessário preencher os dados relativos à geometria da cavilha, tipo de aço e esforço atuante. Considerou-se que o esforço atuante era igual a 12.50 kN.

As verificações realizadas pela folha de cálculo foram:

- Requisitos geométricos;
- Resistência ao corte da cavilha;
- Resistência ao esmagamento da chapa e da cavilha;
- Resistência da cavilha a uma combinação de esforço de corte com flexão.

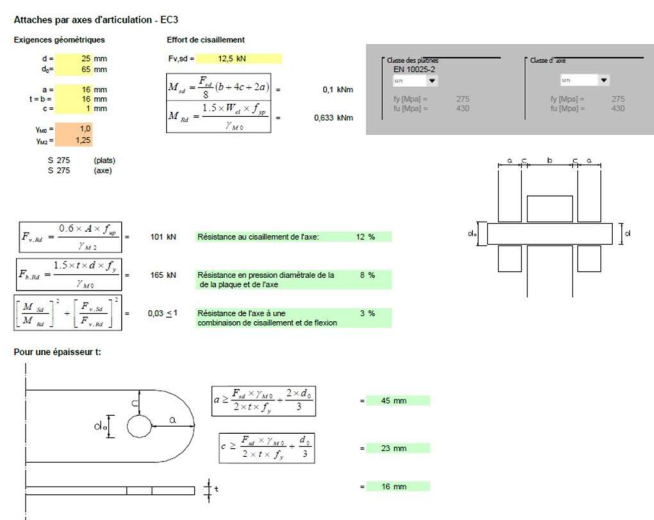


Figura A 34 Verificações de segurança da cavilha

Em paralelo com as verificações realizadas com auxílio da folha de cálculo Excel, foi ainda criado um modelo de elementos finitos *Robot* da cavilha para que as tensões e deformações na chapa fossem verificadas. Para a representação da carga, foi tido em conta o angulo em que o força seria aplicada e, assim, as tensões obtidas para uma cavilha construída a partir de chapa de 16 mm encontram-se representadas na Figura A 35 e as deformações, na Figura A 36.

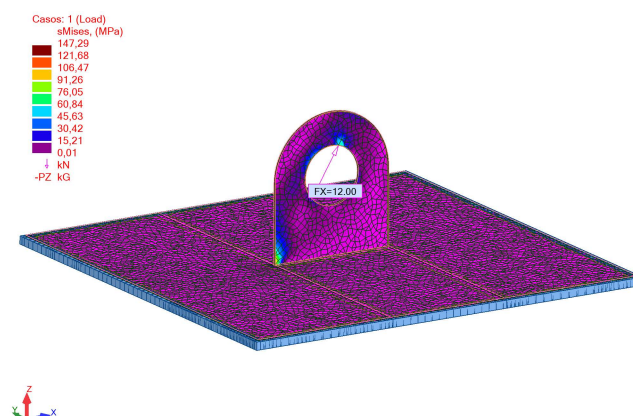


Figura A 35 Tensões na cavilha

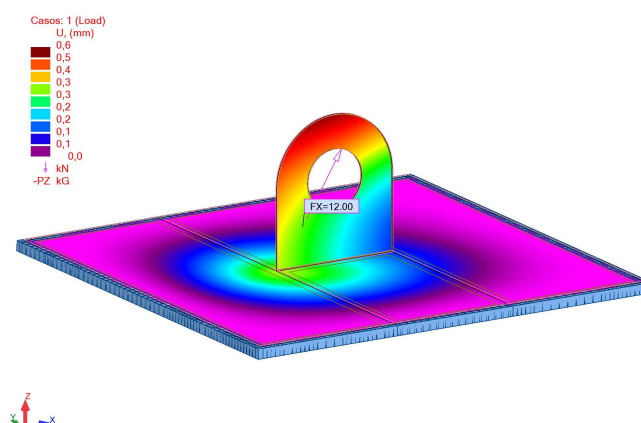


Figura A 36 Deformações na cavilha

- **Estruturas de suporte e elevação**

Para estas estruturas, foi necessário realizar uma revisão à primeira nota de cálculo emitida. Esta revisão resulta duma alteração às cargas inicialmente consideradas e, por conseguinte, alteração às ligações das estruturas.

A primeira estrutura, representada na Figura A 37, era uma estrutura em treliça composta por perfis tubulares CHS.

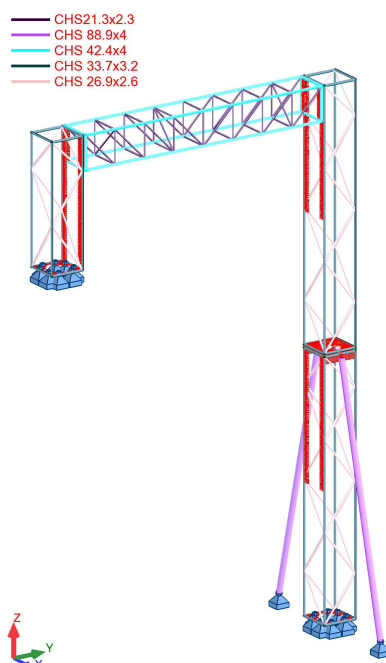


Figura A 37 Modelo da estrutura em treliça

As cargas consideradas são apresentadas na Tabela A 4, sendo que o peso próprio é automaticamente tido em conta pelo programa de cálculo.

Tabela A 4 Cargas consideradas - Estrutura em treliça

Ação	Valor
Ação permanente: peso próprio	Automático
Ação variável: sobrecarga vertical	17.50 kN
Ação variável: sobrecarga horizontal	14.00 kN

Na Figura A 38 encontra-se a representação no modelo de cálculo das cargas consideradas.

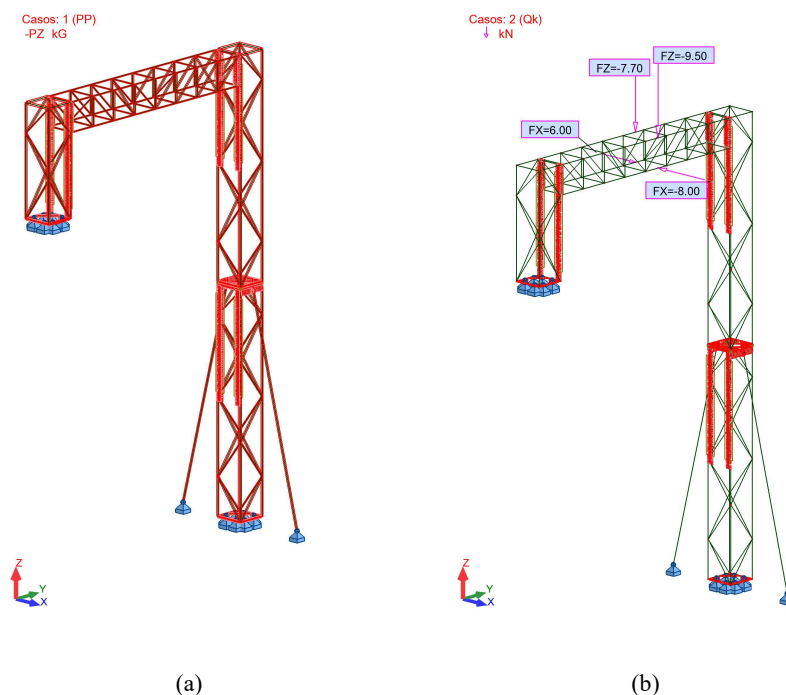


Figura A 38 Situações de cargas consideradas para verificação da segurança da estrutura em treliça: (a) peso próprio da estrutura e (b) ações variáveis

A estrutura teria duas bases com ligações ao betão realizadas através de chumbadores que impediriam translações segundo os três eixos.

Na Tabela A 5 são apresentadas as combinações das ações consideradas para o dimensionamento da primeira estrutura.

Tabela A 5 Combinação de ações - Estrutura em treliça

Caso	Nome do caso	Natureza	Tipo de análise
200	$1.35G_k + 1.5Q_k$	Permanente	Combinação linear
300	$1.0G_k + 1.0Q_k$	Permanente	Combinação linear

Assim que todas as cargas e combinações de ações são definidas e aplicadas à estrutura, procede-se ao cálculo da mesma e à obtenção dos diagramas de esforços para a situação mais desfavorável.

Na Figura A 39, Figura A 40 e Figura A 41 são apresentados os diagramas de esforços da estrutura.

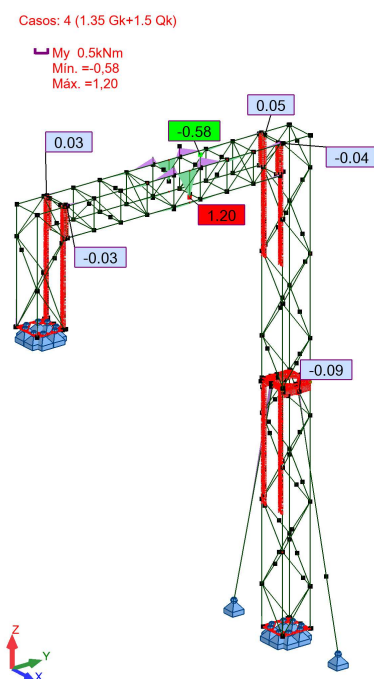


Figura A 39 Momento fletor segundo y (M_y) – Musée Carnavalet: estrutura em treliça

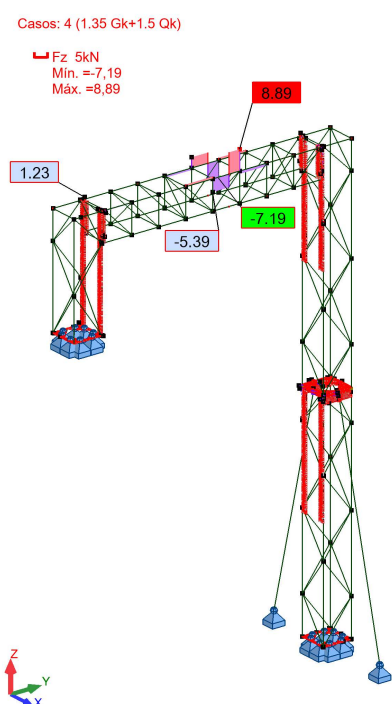


Figura A 40 Esforço de corte segundo z (F_z) – Musée Carnavalet: estrutura em treliça

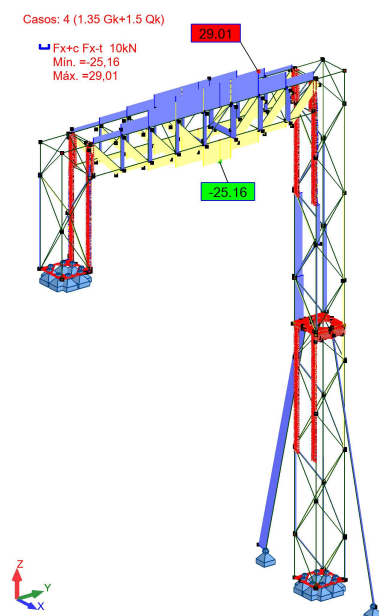


Figura A 41 Esforço axial segundo x (F_x) – Museu Carnavalet: estrutura em treliça

As ligações entre as treliças verticais (pilares) e a horizontal (viga) são conseguidas através de ligações aparafusadas e, assim, é necessária apresentar o mapa de tensões nas chapas (Figura A 42) que compõem as ligações.

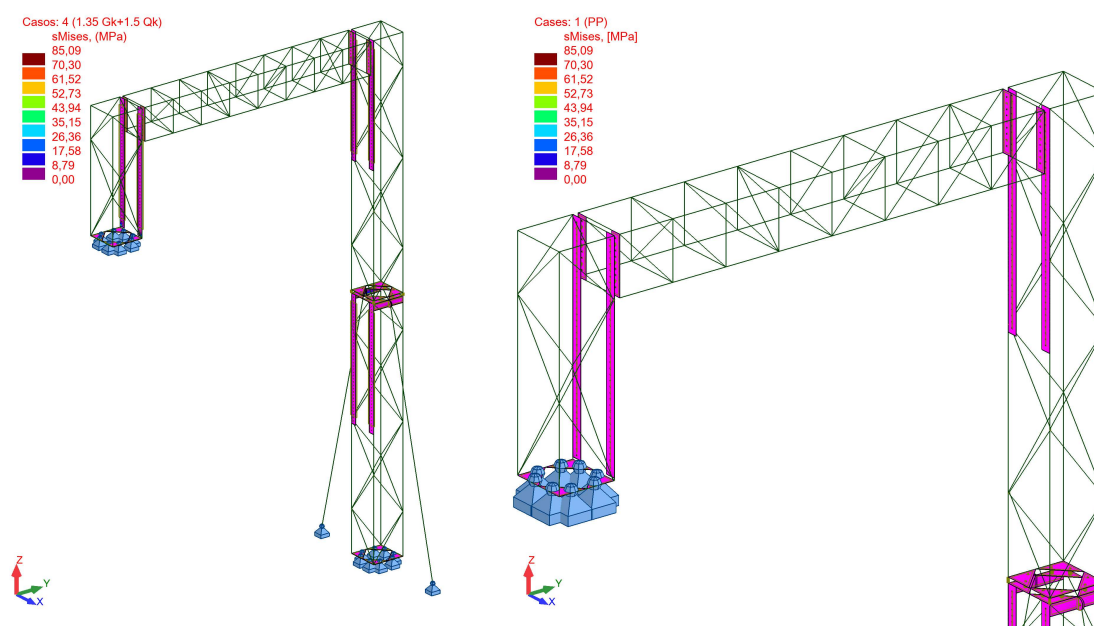


Figura A 42 Tensões nas chapas de ligação – Museu Carnavalet

Tendo todos os esforços apresentados, de seguida, na nota de cálculo, são apresentados os cálculos de verificação de segurança de todos os elementos que constituem a estrutura. Como a estrutura é composta por muitos elementos, é apresentada uma lista de todos eles, retirada diretamente do programa de cálculo, onde constam o número da peça no programa,

o perfil da secção, o material, a esbelteza segundo y e z, o rácio da relação de flexão composta e o caso de cargas condicionante para a verificação da segurança. Tendo essa tabela, para que a nota de cálculo não se torne exaustiva, apresentam-se apenas os cálculos detalhados para os elementos em que a relação de flexão composta obtida foi mais elevada. Na Figura A 43 encontra-se um exemplo de relatório de cálculo obtido no programa para uma barra onde o rácio da relação de flexão composta era mais elevado.

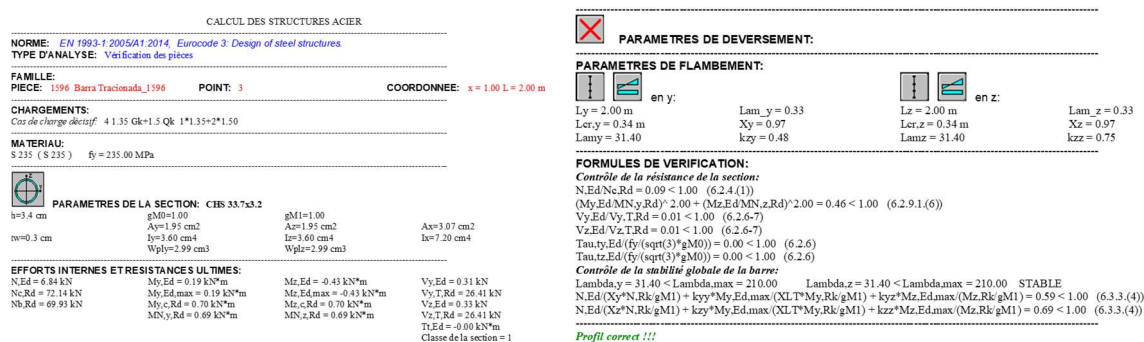


Figura A 43 Relatório de cálculo para uma das barras mais esforçadas – Musée Carnavalet: estrutura em treliça

Depois de serem apresentados todos os resultados para ELU, é necessário assegurar que os deslocamentos da estrutura não ultrapassem os limites aceitáveis. Para a combinação de ações em ELS, os deslocamentos obtidos são apresentados na Figura A 44.

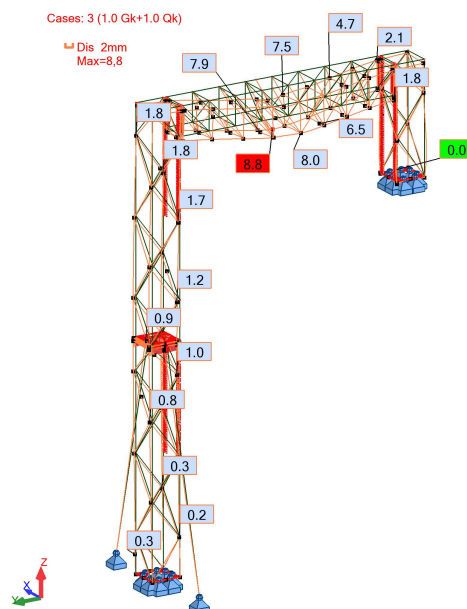


Figura A 44 Deslocamentos – Musée Carnavalet: estrutura em treliça

Para o cálculo das ligações nas bases é necessário retirar as reações nos apoios. Estas reações são apresentadas, para a combinação em ELU, na Figura A 45.

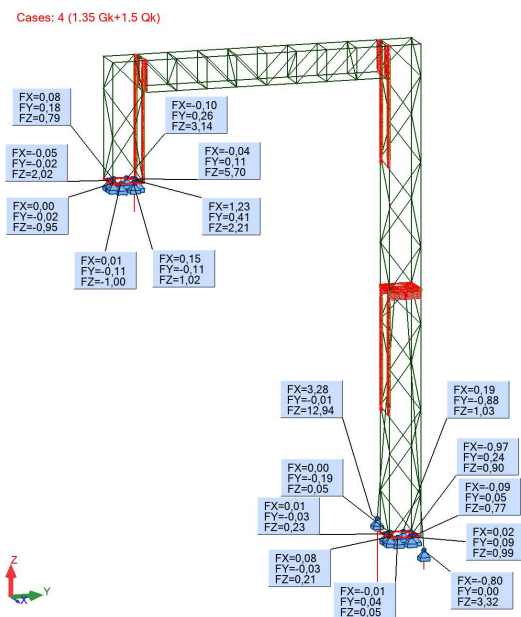


Figura A 45 Reações nos apoios – Musée Carnavalet: estrutura em treliça

Para o cálculo das ligações aparafusadas, foi também necessário retirar os esforços que cada parafuso teria de suportar. Tendo as reações, recorrendo a uma folha de cálculo Excel já existente, são realizadas todas as verificações de segurança relativas a ligações aparafusadas. Na folha foi necessário preencher dados sobre os esforços de corte e tração a que a ligação estaria sujeita, características dos parafusos, espaçamento das furações e características das chapas de ligação. Os cálculos e verificações necessárias para ligações aparafusadas segundo a Parte 1-8 do EC3 (CEN, 2010a) realizados na folha de cálculo foram:

- Disposição dos parafusos;
- Resistência ao corte do parafuso;
- Resistência à tração do parafuso;
- Resistência ao esmagamento da chapa;
- Punsoamento da chapa;
- Interação corte-tração no parafuso.

Na Figura A 46 encontra-se um exemplo de situação de cálculo de uma das ligações aparafusadas da estrutura em treliça.

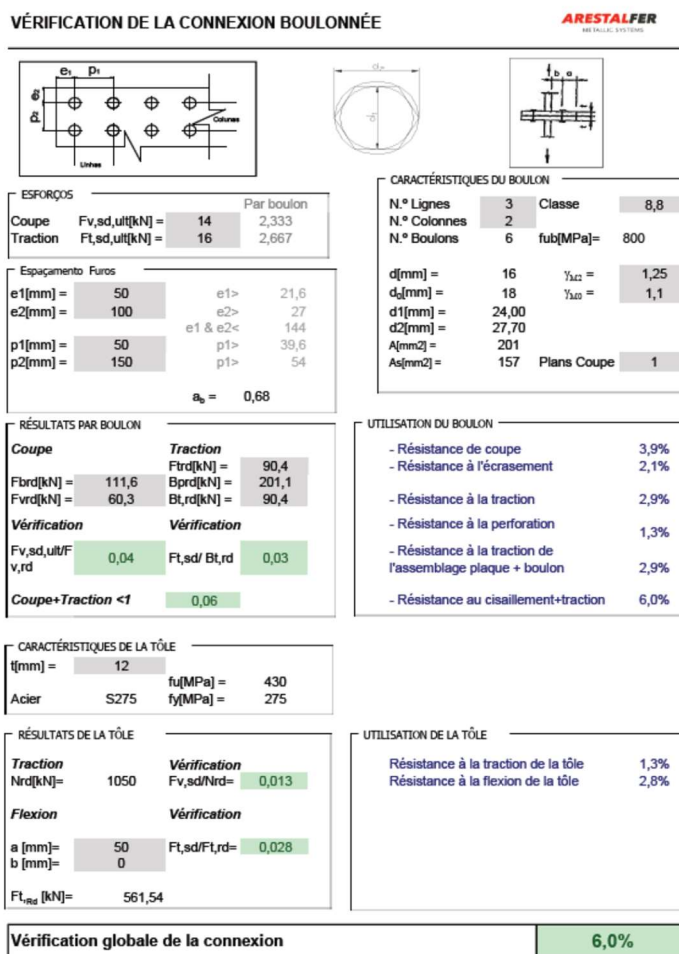


Figura A 46 Verificação de uma ligação aparafusada – Musée Carnavalet: estrutura em treliça

As ligações das bases da estrutura são ligação ao betão, que foram calculadas recorrendo ao programa da HILTI, *PROFIS Anchor*. Neste programa, começa-se por escolher o tipo de bucha que se pretende usar, as características do betão da ligação e os esforços a que a ligação terá de resistir. De seguida é necessário modelar a ligação, fornecendo ao programa todos os dados relativos à geometria necessários. Neste programa existem tipos de ligação pré-concebidos, o que na maioria das ligações agiliza o trabalho, mas neste caso a ligação era em diagonal e teve de ser definida manualmente. Na Figura A 47 apresenta-se o relatório de cálculo retirado do programa e que foi adicionado à nota de cálculo da estrutura.

www.hilti.pt
Société: Anestaller
Prescripteur: 1
Adresse: Sous projet I Pos. N°:
Tel / Fax: 14/09/2019
E-mail:

Page: 1
Projet: 1
Date: 14/09/2019

Profis Anchor 2.8.3

Commentaire du prescripteur:

1 Données d'entrée

Type et taille de cheville: HUS3-H 14 h_nom1

Set Sismique ou toute autre solution pour remplir l'espace annulaire

Profondeur d'implantation effective: $h_{ef} = 40 \text{ mm}$, $h_{max} = 65 \text{ mm}$

Matériau: 1.5525

Homologation: ETA-13/1038

Délivré / Validité: 27/04/2019 / -

Méthode de calcul: Jugement d'expert SOFA - après essais ETAG

Montage avec écartement: $e_s = 0 \text{ mm}$ (sans écartement); $t = 12 \text{ mm}$

Platine: $l_p \times l_t \times t = 520 \text{ mm} \times 520 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ (Épaisseur de platine recommandée: non calculé pas de profil)

Profil: Béton non fissuré béton, C20/25, $f_{ct,med} = 25,00 \text{ N/mm}^2$; $h = 200 \text{ mm}$

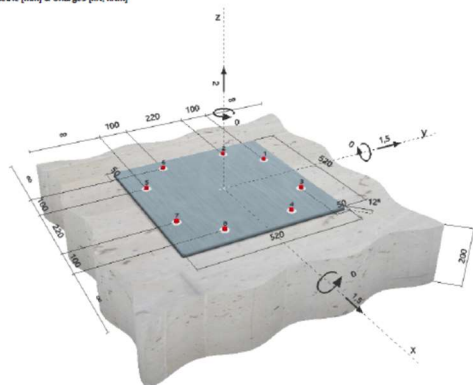
Matériau de base: trou foré avec perforateur, condition d'installation: sec

Installation: Pas de renforcement ou distance entre armatures $\geq 150 \text{ mm}$ (tous Ø) ou $\geq 100 \text{ mm}$ (Ø $\leq 10 \text{ mm}$)

Renforcement: Pas de renforcement de bord longitudinal

* - Le calcul de la cheville se base sur l'hypothèse d'une platine rigide.

Géométrie [mm] & Charges [kN, kNm]



Les données d'entrée et les résultats doivent être vérifiés quant aux conditions existantes et leur possibilité!
PROFIS Anchor (c) 2003-2009, Hilti AG, FL-9494 Schaan, Hilti est une marque déposée de Hilti AG, Schaan

www.hilti.pt
Société: Anestaller
Prescripteur: 2
Adresse: Sous projet I Pos. N°:
Tel / Fax: 14/09/2019
E-mail:

Page: 2
Projet: 1
Date: 14/09/2019

Profis Anchor 2.8.3

2 Preuve I Utilisation (Cas prépondérants)

Charge	Méthode de calcul	Valeurs de calcul [kN]		Utilisation	
		Charge	Capacité	R_s / R_t [%]	Statut
Traction	Rupture par cône de béton	2,000	88,342	3 / -	OK
Cisaillement	Rupture par effet de levier	2,121	176,683	- / 2	OK
Charges combinées traction et cisaillement		0,023	0,012	1,5	OK

3 Avertissements

* Pour plus de détails, messages ou avertissements, se reporter à la note de calcul détaillée!

La fixation remplit les critères de conception !

4 Remarques, commentaires

* Toutes les informations et toutes les données contenues dans le Logiciel ne concernent que l'utilisation des produits Hilti et sont basées sur des principes, des formules et des réglementations de sécurité conformes aux consignes techniques d'Hilti et sur des instructions d'opération, de montage, d'assemblage, etc., que l'utilisateur doit suivre à la lettre. Tous les chiffres qui y figurent sont des moyennes et, en conséquence, des tests d'utilisation spécifiques doivent être conduits avant utilisation du produit Hilti applicable. Les résultats des calculs exécutés au moyen du Logiciel reposent essentiellement sur les données que vous y saisissez. En conséquence, vous êtes seul responsable de l'absence d'erreurs, de l'exactitude et de la pertinence des données saisies par vos soins. En outre, vous êtes seul responsable de la vérification des résultats du calcul et de leur validation par un expert, particulièrement en ce qui concerne le respect des normes et permis applicables avant leur utilisation pour votre site en particulier. Le Logiciel ne sert que d'aide à l'interprétation des normes et des permis sans aucune garantie concernant l'absence d'erreurs, l'exactitude et la pertinence des résultats ou leur adaptation à une application spécifique.

* Vous devez prendre toutes les mesures nécessaires et raisonnables pour empêcher ou limiter les dommages causés par le Logiciel. Plus particulièrement, vous devez prendre vos dispositions pour effectuer régulièrement une sauvegarde des programmes et des données et, si applicable, exécuter les mises à jour régulièrement fournies par Hilti. Si vous n'utilisez pas la fonction AutoUpdate du Logiciel, vous devez vous assurer que vous utilisez dans chaque cas la version actuelle et à jour du Logiciel, en évitant des mises à jour manuelles via le Site Web Hilti. Hilti ne sera tenu responsable d'aucune conséquence, telle que la nécessité de récupérer des données ou programmes perdus ou endommagés, découlant d'un manquement coupable de votre part à vos obligations.

Les données d'entrée et les résultats doivent être vérifiés quant aux conditions existantes et leur possibilité!
PROFIS Anchor (c) 2003-2009, Hilti AG, FL-9494 Schaan, Hilti est une marque déposée de Hilti AG, Schaan

Figura A 47 Relatório de cálculo de uma ligação ao betão – Musée Carnavalet: estrutura em treliça

A segunda estrutura consistia no pórtico metálico representado na Figura A 48. Este pórtico, intitulado de pórtico metálico 1, era constituído por tubos SHS, perfis IPE e HEA, e os seus apoios não permitiam translações segundo os eixos x, y e z.

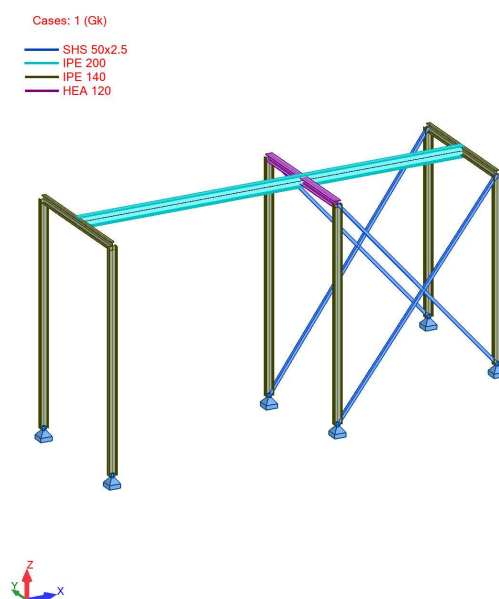


Figura A 48 Modelo do pórtico metálico 1 – Musée Carnavalet

As ações consideradas para o dimensionamento foram o peso próprio e uma carga variável pontual dinâmica com valor de 17 kN. Esta carga dinâmica pretende simular o deslocamento do módulo de escada a ser transportado através da viga principal do pórtico. Na Figura A 49 apresentam-se os casos de carga considerados.

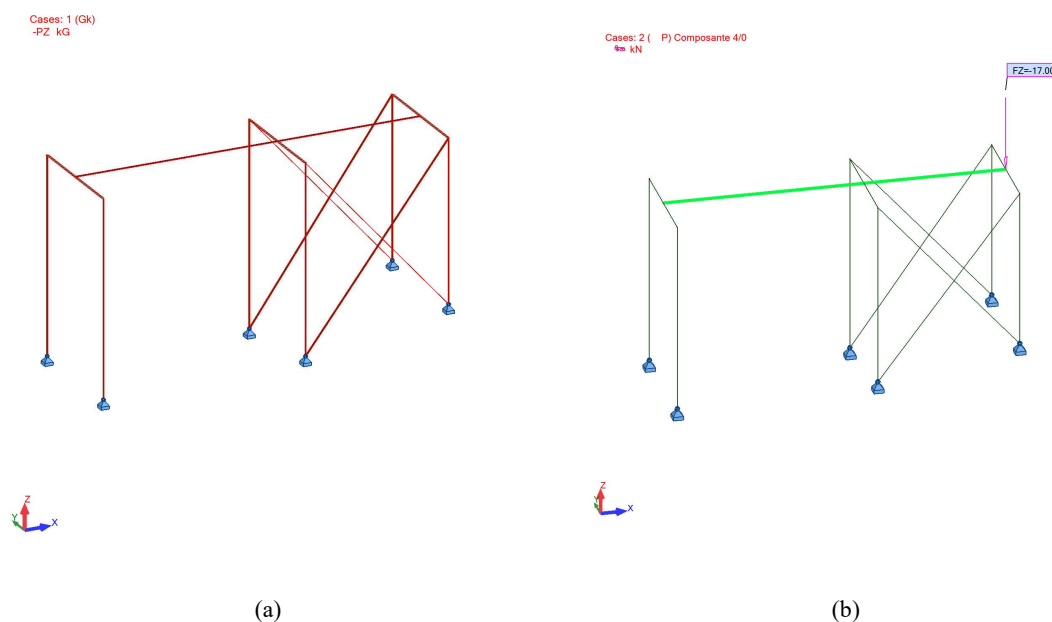


Figura A 49 Casos de carga: Pórtico metálico 1, (a) Peso próprio, (b) Carga dinâmica – Musée Carnavalet

As combinações de ações consideradas para verificação de segurança da estrutura encontram-se na Tabela A 6.

Tabela A 6 Combinação de ações - Pórtico metálico 1

Caso	Nome do caso	Natureza	Tipo de análise
200	1.35Gk+1.5Qk	Permanente	Combinação linear
300	1.0Gk+1.0Qk	Permanente	Combinação linear

Com a utilização da carga dinâmica, para a obtenção dos diagramas de esforço assim como para a verificação de segurança, o programa de cálculo considera, automaticamente, a posição mais desfavorável para a estrutura em que a carga poderá estar. Assim, os diagramas obtidos encontram-se representados na Figura A 50, Figura A 51 e Figura A 52.

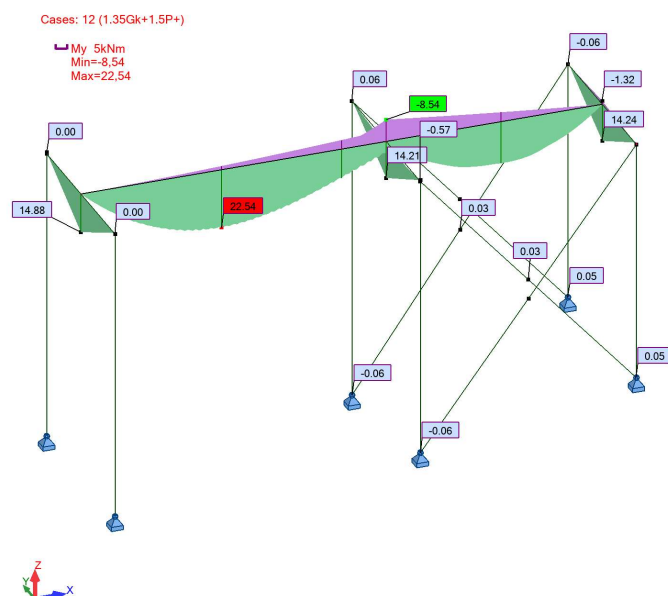


Figura A 50 Momento fletor segundo y (M_y) – Musée Carnavalet: pórtico metálico 1

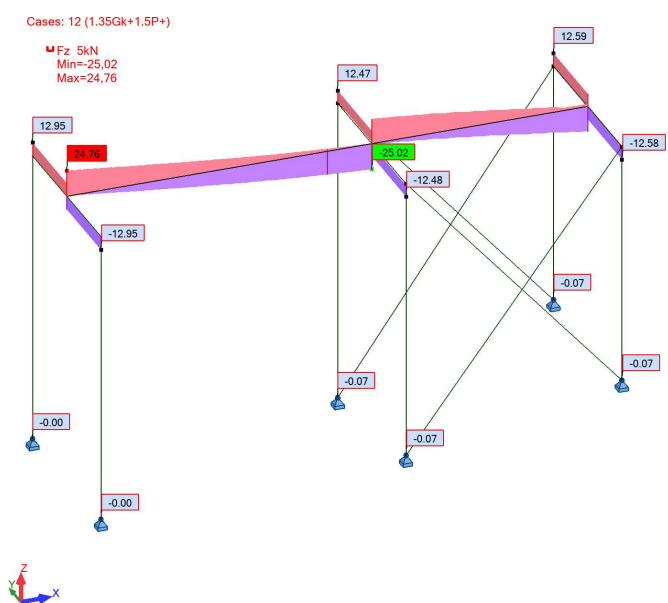


Figura A 51 Esforço de corte segundo z (F_z) – Musée Carnavalet: pórtico metálico 1

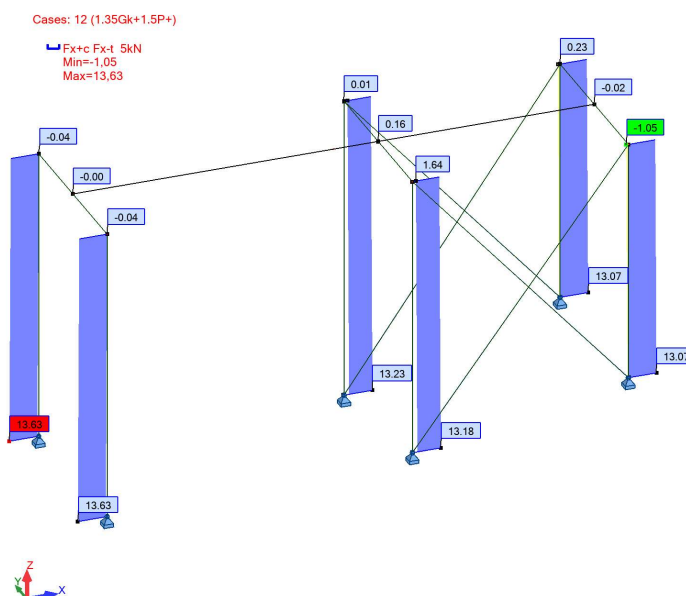


Figura A 52 Esforço axial segundo x (F_x) – Musée Carnavalet: pórtico metálico 1

Os processos de verificação de segurança realizados são idênticos aos já descritos anteriormente, pelo que não serão aqui novamente referidos.

Sendo que os deslocamentos na estrutura são sempre alvo de análise, na Figura A 53 encontram-se representados para a combinação de ações de Estado Limite de Serviço.

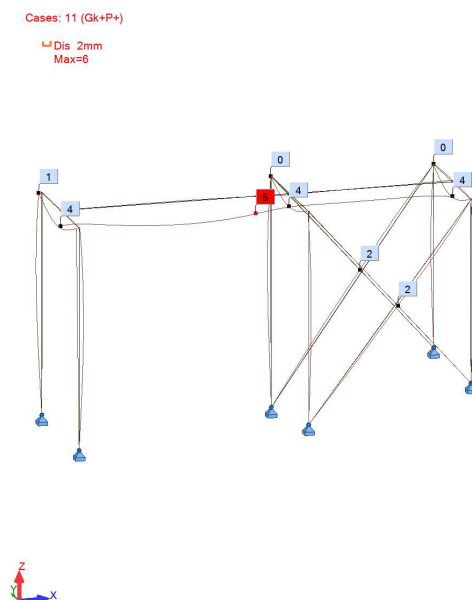


Figura A 53 Deslocamentos – Musée Carnavalet: pórtico metálico 1

Para este pórtico metálico, as ligações dos seus apoios eram, à semelhança da estrutura em treliça, ligações ao betão através de buchas, pelo que o processo de dimensionamento foi semelhante.

Neste caso, existiam ligações aparafusadas entre pilares-vigas-travamento (Figura A 54), viga-viga (Figura A 55) e entre travamentos (Figura A 56). O software de cálculo usado para a verificação do dimensionamento destas ligações foi o *Idea StatiCa*.

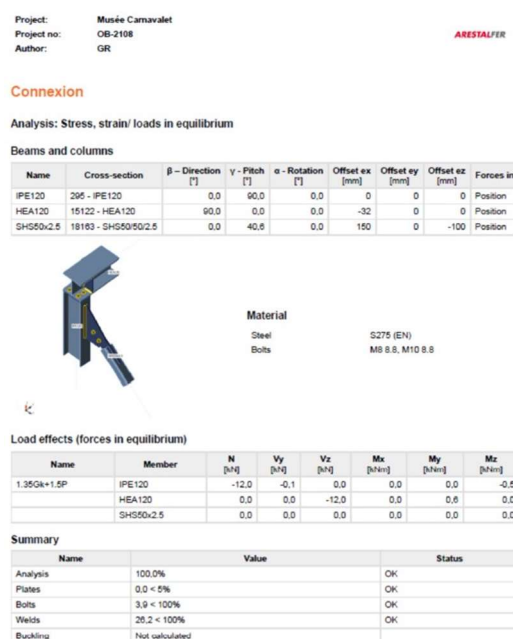


Figura A 54 Ligação aparafusada pilar-viga-travamento – Musée Carnavalet: pórtico metálico 1

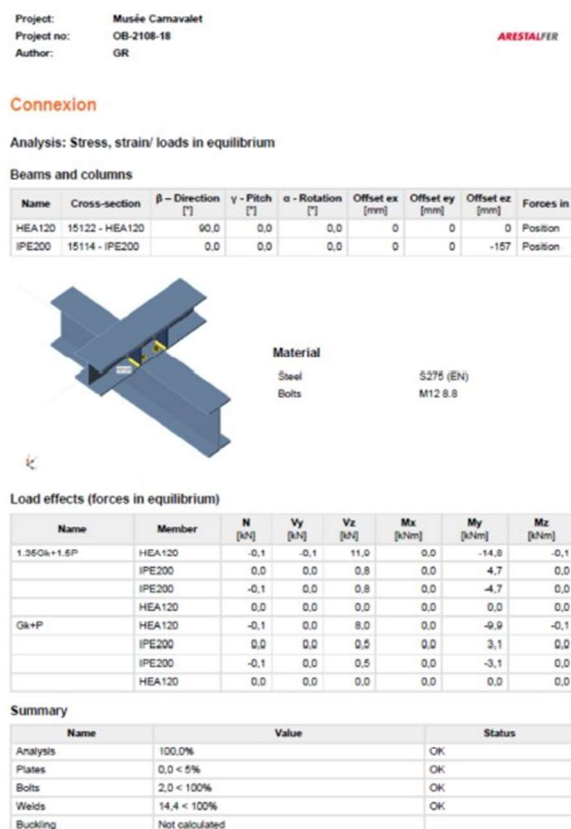


Figura A 55 Ligação aparafusada viga-viga – Musée Carnavalet: pórtico metálico 1

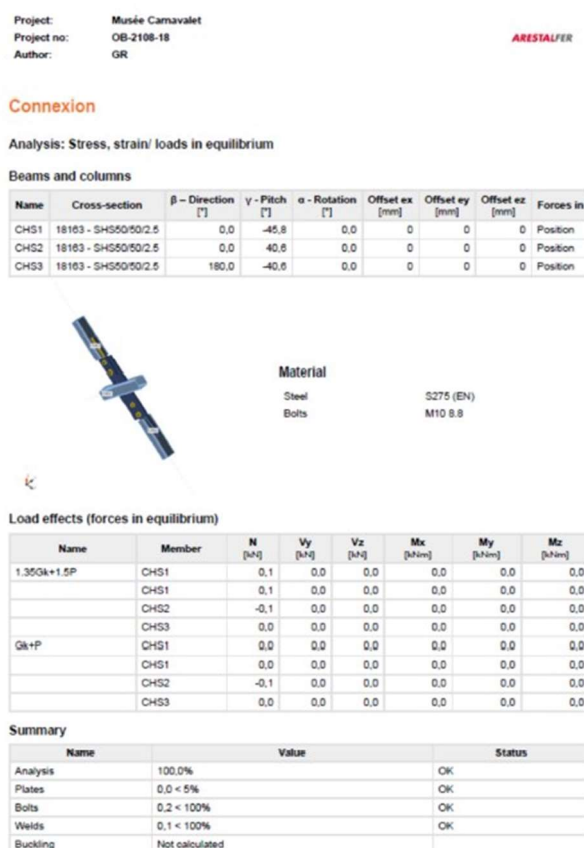


Figura A 56 Ligação aparafusada entre travamentos – Musée Carnavalet: pórtico metálico 1

A terceira estrutura era também um pórtico designado por pórtico metálico 2, representado na Figura A 57. Este pórtico é semelhante ao pórtico metálico 2, os perfis que o constituem têm as mesmas secções, as cargas aplicadas são iguais, assim como os apoios.

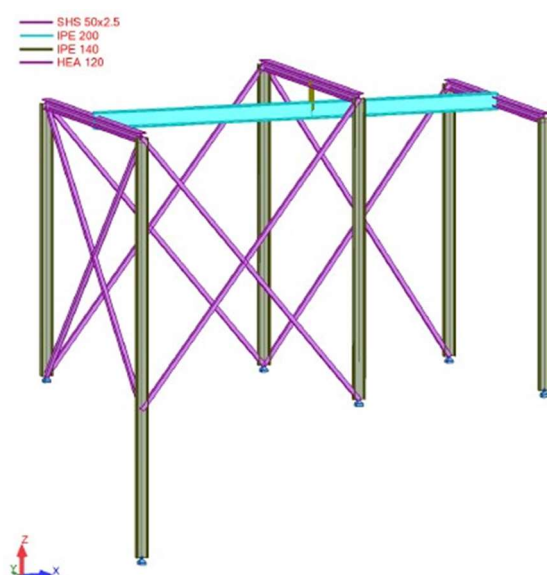


Figura A 57 Modelo do pórtico metálico 1 – Musée Carnavalet

Os diagramas de esforços obtidos para a combinação em Estado Limite Último são apresentados na Figura A 58, Figura A 59 e Figura A 60.

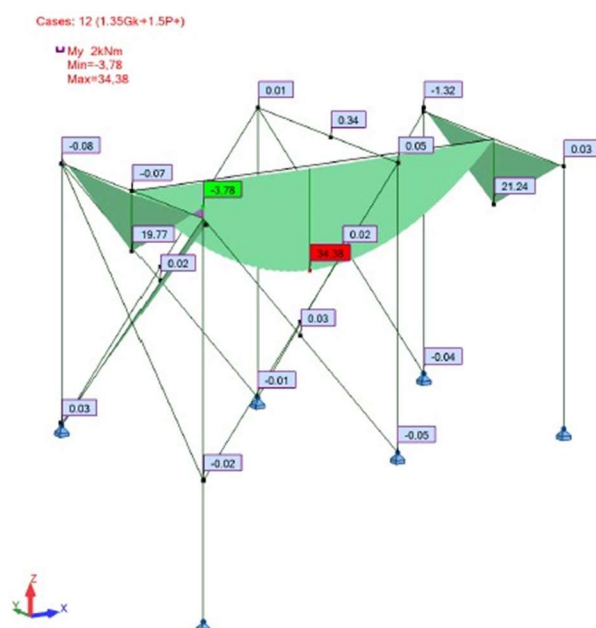


Figura A 58 Momento fletor segundo y (My) – Musée Carnavalet: pórtico metálico 2

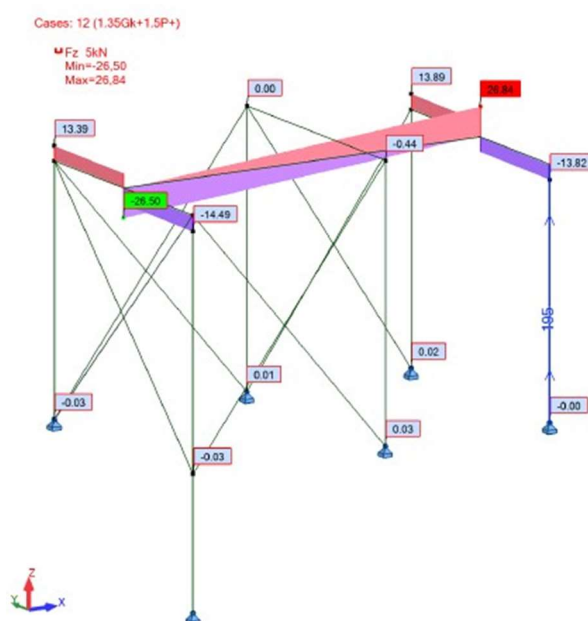


Figura A 59 Esforço de corte segundo z (Fz) – Musée Carnavalet: pórtico metálico 2

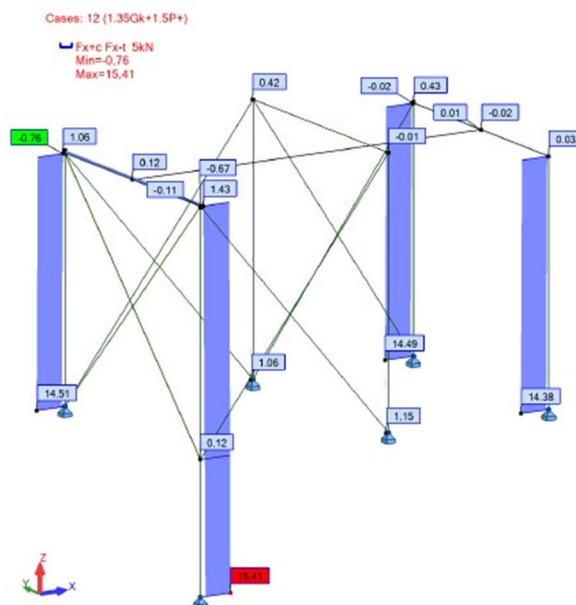


Figura A 60 Esforço axial segundo x (F_x) – Musée Carnavalet: pórtico metálico 2

Os deslocamentos obtidos para a combinação de Estado Limite de Utilização são apresentados na Figura A 61.

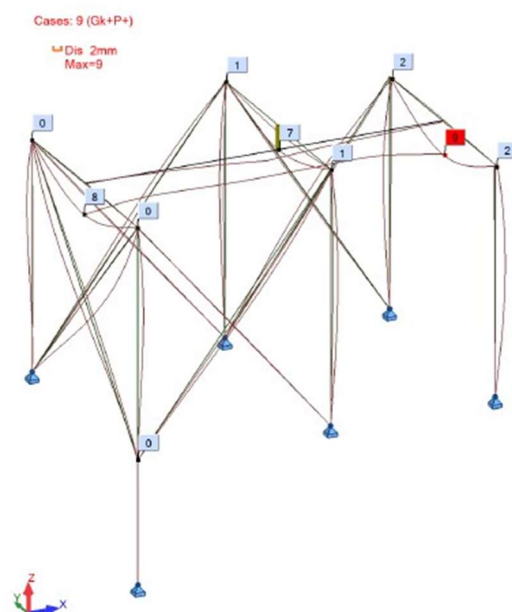


Figura A 61 Deslocamentos – Musée Carnavalet: pórtico metálico 2

As ligações metálicas e ao betão deste pórtico seriam iguais às do pórtico metálico 1, portanto não serão repetidas.

A última estrutura dimensionada foram duas escoras, em perfil SHS, representadas na Figura A 62.



Figura A 62 Modelo das escoras – Musée Carnavalet

Os apoios inferiores das escoras teriam translação bloqueada segundo as três direções, enquanto que os apoios na parte superior só a teriam bloqueada segundo x e y.

Para além do peso próprio, as outras cargas consideradas foram cargas variáveis: uma na direção vertical igual a 10.00 kN e outra na direção horizontal igual a 2.50 kN, como representado na Figura A 63.

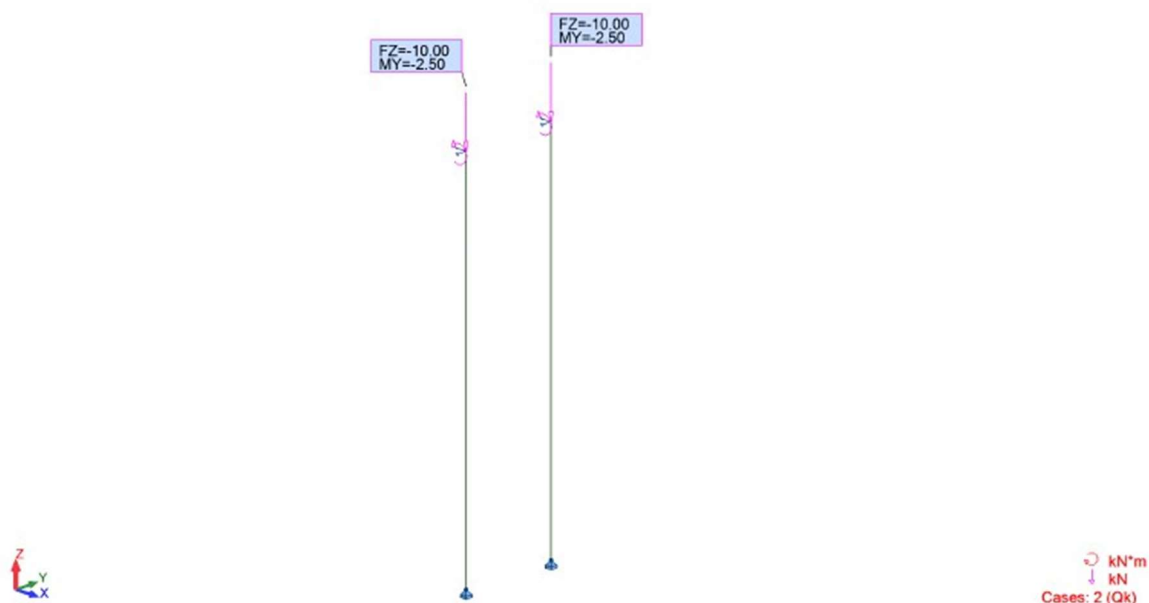


Figura A 63 Situações de cargas consideradas para verificação da segurança das escoras – Musée Carnavalet

As combinações de carga realizadas foram as mesmas que as das estruturas anteriores e os diagramas de esforços obtidos para a combinação mais desfavorável são apresentados na Figura A 64, Figura A 65 e Figura A 66.

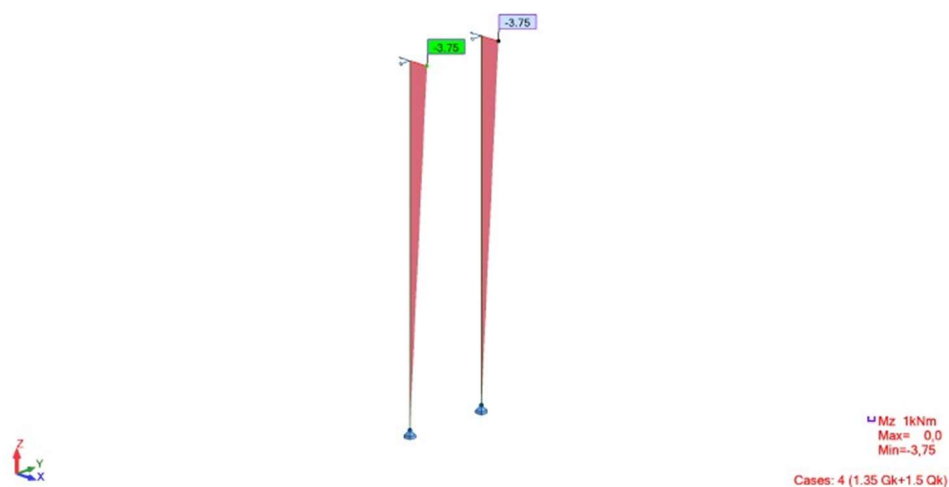


Figura A 64 Momento fletor segundo y (M_y) – Musée Carnavalet: escoras

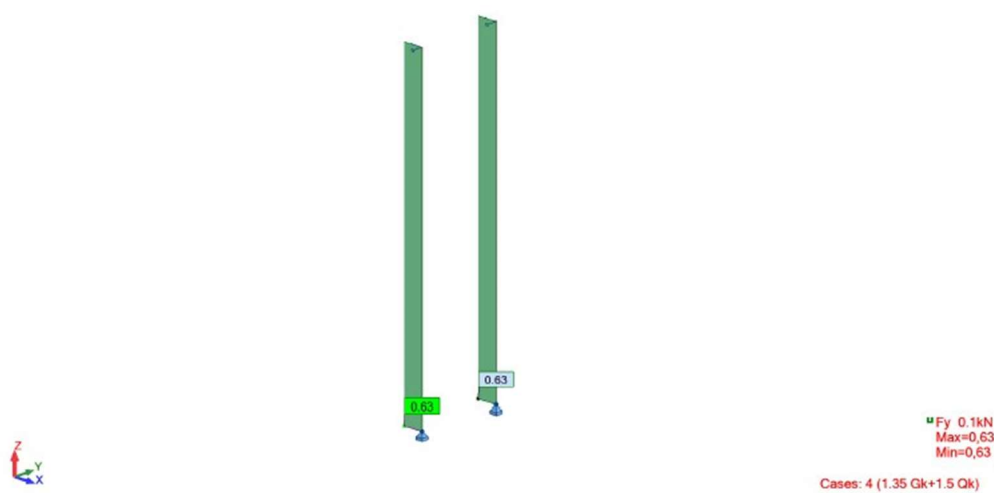


Figura A 65 Esforço de corte segundo y (F_y) – Musée Carnavalet: escoras

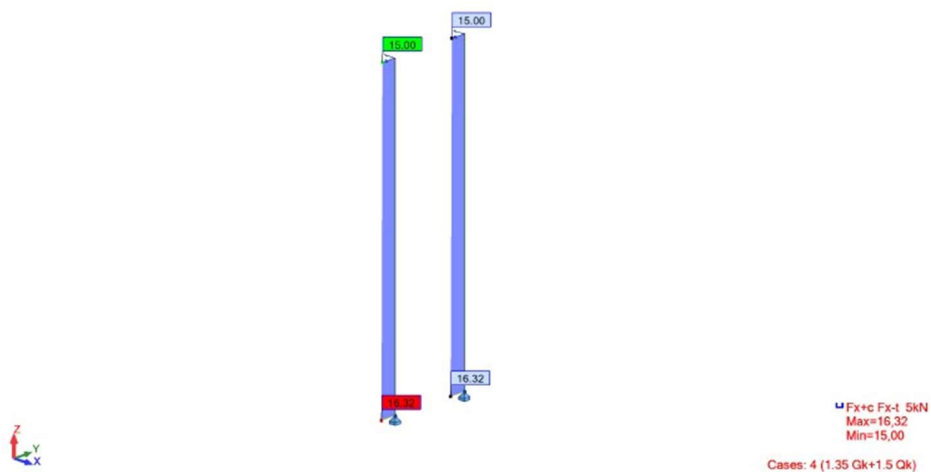


Figura A 66 Esforço axial segundo x (F_x) – Musée Carnavalet: escoras

Para os esforços obtidos nas escoras na situação de carregamento mais gravosa, o relatório de cálculo para cada uma das escoras obtido, encontra-se na Figura A 67.

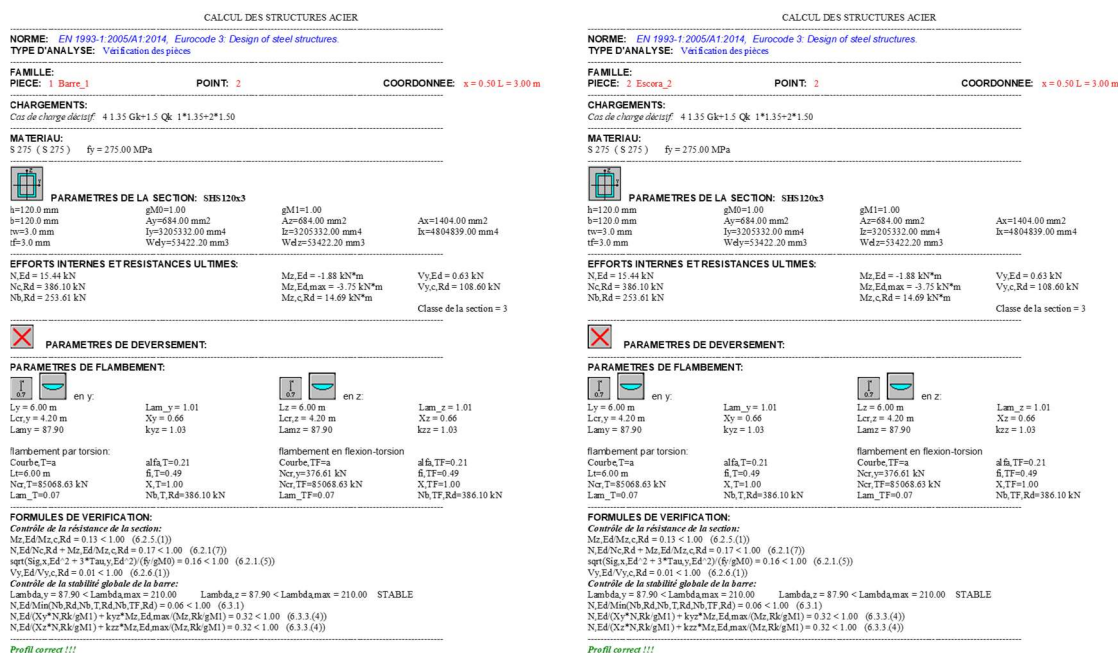


Figura A 67 Relatório de cálculo para uma das barras mais esforçadas – Musée Carnavalet: escoras

Os deslocamentos resultantes da combinação de cargas em ELS são apresentados na Figura A 68.

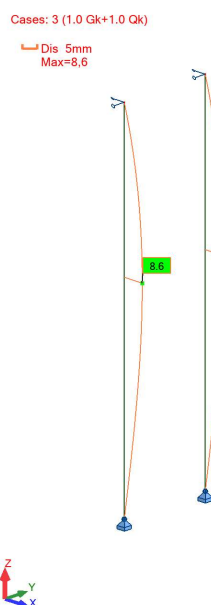


Figura A 68 Deslocamentos – Musée Carnavalet: escoras

O cálculo da ligação das escoras ao betão foi, mais uma vez, realizado com auxílio do programa da HILTI, PROFIS Anchor. Na Figura A 69, apresenta-se o relatório de cálculo

retirado do programa, onde se encontram todas as verificações de segurança realizadas pelo mesmo.

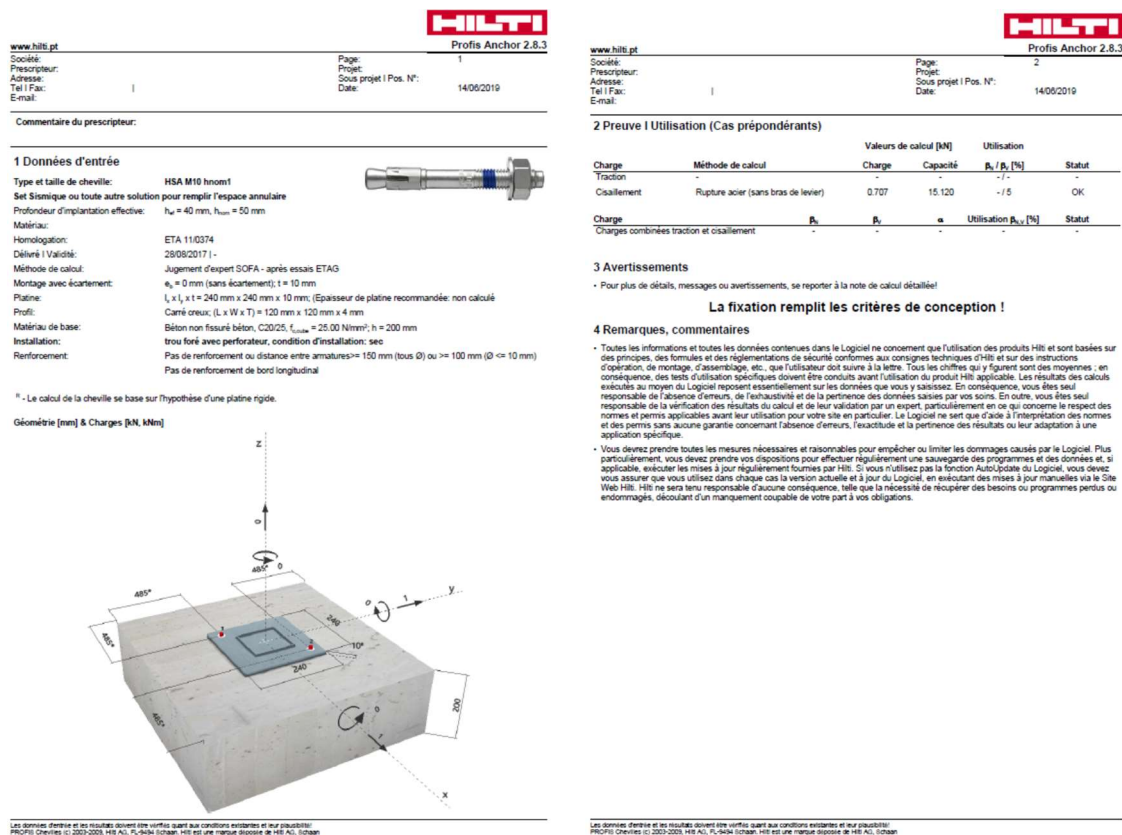


Figura A 69 Relatório de cálculo de uma ligação ao betão – Museu Carnavelet: escoras

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este anexo fez referência ao relatório de estágio curricular realizado na empresa Arestalfer, S.A.

O estágio pode ser dividido em dois momentos, sendo o primeiro passado no gabinete comercial da empresa, a desempenhar funções de orçamentista, e o segundo, passado no gabinete de projeto, a desenvolver atividades inerentes às funções de um projetista.

Ao longo do documento, apresenta-se uma descrição do todo o trabalho que foi desenvolvido ao longo dos cinco meses de estágio. São apresentadas todas as obras em que se desenvolveu alguma atividade relativa ao estágio e explicados todos os processos envolvidos, métodos de trabalho e programas utilizados.

A escolha de realizar estágio em simultâneo com a concretização do estudo apresentado nesta dissertação teve os seus desafios. Houve momentos em que surgiram dificuldades em coordenar as duas atividades, pelo comprometimento que implica desenvolver um estágio numa empresa onde o trabalho que se está a realizar tem prazos de entrega e em que outros ficam dependentes das atividades que se estavam a desenvolver. Contudo, foi uma oportunidade para adquirir conhecimentos práticos daquilo que foi aprendido ao longo do curso de engenharia civil, tendo aliado uma componente social bastante forte, pela inserção no ambiente de trabalho de uma empresa, a interação com todas as pessoas do meio envolvente e ainda o facto de se ter trabalhado sempre com uma língua estrangeira e com clientes francófonos.